

ГИДРОЛОГИЯ

УДК 627.152.122

DOI: 10.17072/2079-7877-2019-3-34-47

**РАЗМЫВЫ БЕРЕГОВ НА ШИРОТНОМ УЧАСТКЕ СРЕДНЕЙ ОБИ
И ИХ СВЯЗЬ С МОРФОЛОГИЕЙ РУСЛА*****Анна Александровна Куракова**

РИНЦ AuthorID: 1037958, IстинаResearcherID (IRID): 92234587

e-mail: a.a.kurakova@mail.ru

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва***Роман Сергеевич Чалов**

Scopus ID: 7003283104, РИНЦ AuthorID: 58839, ResearcherID: L-8754-2015,

IстинаResearcherID (IRID): 429329

e-mail: rschalov@mail.ru

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

Размывы берегов как одна из форм проявлений русловых процессов, достигающих часто экстремальных значений и представляющих значительную угрозу для населенных пунктов и хозяйственных объектов в пределах приречных территорий, как и русловой режим средней Оби, практически не изучены. В статье дается анализ размыва берегов на широтном участке средней Оби на фоне распространения различных морфодинамических типов русла. На основе данных дистанционного зондирования Земли за разные временные интервалы были получены значения скоростей и протяженности размыва берегов, определены основные параметры излучин русла и излучин рукавов. Показано, что темпы размыва зависят от степени развитости излучин русла, излучин основных рукавов раздвоенного русла и рукавов разветвлений, причем эта зависимость проявляется только для развитых и крутых излучин. У пологих излучин русла и изгибов потока возле островов скорости размыва берегов зависят от местных условий. Увеличение радиуса кривизны русла приводит к удлинению фронта размыва и снижению скорости отступления берегов. Выявлены закономерные соотношения между скоростями размыва, протяженностью фронта размыва берегов и параметрами излучин русла, основных рукавов раздвоенного русла и рукавов разветвлений как на всем широтном участке реки, так и в пределах его отдельных частей (морфологически однородных участков), выделяемых по ответвлениям от реки рукавов раздвоенного русла. Установлено, что определяющим фактором размыва берегов на широтном участке средней Оби является степень извилистости русла. Вместе с тем отвлечение стока в рукава раздвоенного русла не оказывает существенного влияния на размыв берегов, поскольку сопоставимо с затоплением поймы во время половодья.

Ключевые слова: русловые процессы, размывы берегов, раздвоенное русло, излучины, разветвления, фронт размыва.

© Куракова А.А., Чалов Р.С., 2019

* Выполнено по плану НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова при поддержке РФФИ (проект 18-17-00086 – размывы берегов рек в разветвленном русле) и РФФИ (проект 18-05-00487 – экстремальные размывы берегов).

SHORES EROSION WITHIN LATITUDINAL SECTION OF THE MIDDLE OB AND ITS CORRELATION WITH MORPHOLOGY OF THE CHANNEL**Anna A. Kurakova**

RSCI AuthorID: 1037958, IstinaResearcherID (IRID): 92234587,

e-mail: a.a.kurakova@mail.ru

*Lomonosov Moscow State University, Moscow***Roman S. Chalov**

Scopus ID: 7003283104, RSCI AuthorID: 58839, ResearcherID: L-8754-2015,

IstinaResearcherID (IRID): 429329

e-mail: rschalovmail.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Shores erosion as forms of channel processes that often reach extreme values and pose a significant threat to human settlements and economic objects within the riverine areas, as well as the channel processes of the middle Ob are practically not studied. We examine the correlation between bank erosion within the latitudinal section of the middle Ob and the distribution of different morphodynamic types of the channel. Based on the remote sensing data for different time intervals, the values of erosion rates and the length of the banks erosion were obtained, and also the main parameters of the meandering channel bends, bends of the main channel and bends of the braided channel were determined. It is shown that the erosion rates depend on the degree of development of the main channel bends and bends of the braided channel. This is observed on the meander bends with high radius of curvature. The erosion rate of meander bends with a low radius of curvature is determined by local conditions. An increase in the radius of the bends curvature leads to elongation of the erosion and a decrease in the erosion rate. It has been established that the determining factor in the shores erosion in the latitudinal section of the middle Ob is the degree of the channel curvature, while the flow diversion to the arms of the bifurcated channel has no significant effect, since it is comparable to floodplain inundation during high water.

К е у в о р д с : channel processes, shore erosion, braided channel, bends, forks, erosion.

Введение

Река Обь, одна из крупнейших рек России, на широтном участке среднего течения является важной водно-транспортной магистралью и водохозяйственным объектом Ханты-Мансийского автономного округа и нефтедобывающего региона Западной Сибири. Ее среднегодовой расход воды перед устьем Иртыша составляет 7350 м³/с, возрастая незначительно в пределах участка благодаря небольшим притокам – Ваха в его начале, Тромъегана, Большого Югана, Большого Салыма и Назыма. Характерная особенность средней Оби – разделение ее на два самостоятельных рукава, располагающихся в правой (основной рукав – до 70 % общего расхода воды в реке) и левой частях днища долины, разделенные поймой шириной от 20 до 40 км и имеющие между собой гидравлическую связь по многочисленным и относительно маловодным пойменным протокам, расчленяющим пойму на островные массивы. Такое раздвоенное русло [10] образовано протоками Юганская Обь (длина 195 км), Большая Салымская (62 км) и Неулева (78 км), самостоятельно впадающей в Иртыш тремя рукавами выше его слияния с основным правым рукавом Оби (рис. 1). Русло формируется в песчаных легкоразмываемых отложениях, что обуславливает свободные условия русловых деформаций, и является широкопойменным. Ширина русла изменяется от 0,8 до 2–3 км в зависимости от местных условий. Пойма реки луговая или закустаренная; многочисленные пойменные протоки способствуют рассредоточению стока [3]. Большое влияние на русловые процессы оказывает подпор от Иртыша, который

распространяется от слияния рек на 200–400 км вверх по течению Оби [1]. В этих условиях берега реки при любом морфодинамическом типе русла интенсивно размываются, создавая опасность разрушения для находящихся на них населенных пунктов, объектов нефтедобывающего комплекса, вызывая интенсивные переформирования русла, проявляющиеся в смещении и спрямлении излучин, отмирании одних и активизации других рукавов.



Рис. 1. Широтный участок средней Оби в пределах ХМАО-Югры: А – от границы ХМАО-Югры до истока Юганской Оби; Б – от истока до устья Юганской Оби; В – от устья Юганской Оби до истока Большой Салымской протоки; Г – от истока до устья Большой Салымской протоки; Д – от истока протоки Неулева до слияния с р. Иртыш

Fig. 1. The latitudinal section of the middle Ob within the KMAO-Ugra: A - from the border of the KMAO-Ugra to the source of the Yuganskaya Ob; Б - from the source to the mouth of the Yuganskaya Ob; В - from the mouth of the Yuganskaya Ob to the source of the Great Salym channel; Г - from the source to the mouth of the Big Salym channel; Д - from the source of the Neule channel to the merge with the Irtysh river

Размыв берегов рек – сложное и многофакторное явление. Он зависит не только от гидрологического режима реки, литологии берегов, наличия прирусловых отмелей, огибая которые поток отклоняется к противоположному берегу, но и от формы и параметров излучин, рукавов разветвлений, взаимодействия руслового и пойменного потоков во время половодья и т.д. [16; 17]. Однако на больших реках, в том числе на Оби, размывы берегов изучались лишь там, где они создали опасность для освоения приречных территорий. Так, на Оби в верхнем (выше г. Барнаула) [9], среднем (в районе г. Колпашево) [13; 14] и нижнем [2; 8] течениях была выполнена оценка этого процесса, что, однако, не дало общего представления о его распространении на реке и тем более об условиях, в которых он развивается. На широтном участке средней Оби (между устьями Ваха и Иртыша) сведения о размывах берегов вообще отсутствуют, несмотря на их широкое распространение и связанные с ними ущербы. Размывы берегов, даже не имеющие экстремальных значений, обуславливают чрезвычайные ситуации, создавая угрозу или приводя к разрушению поселений. Таковы размывы правого берега в старом русле прорванной излучины у п. Вата, в правом рукаве пойменно-руслового разветвления ниже г. Нижневартовска [4], левого берега в нижнем крыле излучины у с. Высокий мыс. Потенциальная опасность существует на всем протяжении участка при освоении приречных территорий, не говоря уже о том, что они – источник поступления в русло наносов, вызывающих обмеление перекатов ниже по течению, и отражение изменений в морфологии русла.

В настоящей статье впервые для широтного участка средней Оби даются оценка условий размыва берегов и их количественные характеристики, устанавливается связь размывов берегов с морфодинамическими типами русла и параметрами его форм. В этом отношении данный участок реки – благоприятный объект для исследования, поскольку река здесь формирует русло в однородных литологических и геоморфологических условиях при практически неизменной водности.

Материалы и методы исследования

Для анализа закономерностей размыва берегов на широтном участке средней Оби были использованы космические снимки серии «Sentinel-2», «Landsat 5 MSS», «КН-4А» и «КН-9» за два временных интервала 1969–1987 гг. и 2017–2018 гг. Оценка темпов многолетних среднегодовых и максимальных смещений русла производилась традиционным методом совмещения положений береговых бровок за 30–45-летний период.

Показателями размывов берегов были приняты средние ($C_{\text{ср}}$, м/год) и максимальные ($C_{\text{макс}}$, м/год) скорости их отступления, протяженность фронта размыва ($L_{\text{фр}}$) и отношение протяженности фронта размыва берега ($L_{\text{фр}}$) к длине береговой линии ($l_{\text{бер}}$) на излучинах русла, излучинах рукавов или изгибов потока у островов ($L_{\text{фр}}/l_{\text{бер}}$). Формы русла характеризуются степенью развитости (l/L), коэффициентом формы ($r/h_{\text{и}}$) и радиусом кривизны (r , км) излучин меандрирующего русла. Эти же показатели применялись для характеристики излучин рукавов в разветвленном русле и изгибов потока возле островов [15].

Полученные по снимкам сведения о распределении размываемых берегов и их приуроченности к формам русла корректировались при проведении русловых исследований на средней Оби в июне 2018 г.

Результаты и их обсуждение

Широтный участок Оби (в пределах Ханты-Мансийского автономного округа-Югры) отличается большим морфодинамическим разнообразием русла: свободные и прорванные излучины, пойменно-русловые, сложные трехрукавные, сопряженные и одиночные разветвления (по классификации МГУ [10]). Самым протяженным типом русла являются свободные излучины (общее их количество – 37), суммарная длина которых 257 км (43,7% длины участка). Сопряженные разветвления имеют длину 66 км (11,2%), одиночные – 52 км (8,8%); в них поток, огибая острова, образует пологие излучины (изгибы) каждого рукава. В пойменно-русловых (65 км, 11,1% длины участка) и сложных трехрукавных разветвлениях (61 км, 10,4%) рукава образуют от 2 до 7–8 излучин. Прорванные излучины (их протяженность 19 км) составляют 3,2% суммарной длины русла. Для русла каждого типа характерно определенное расположение фронта размыва берегов (рис. 2).

Расположение фронта размыва обусловлено определенной структурой потока, соответствующей излучинам или разветвлениям. На излучинах у противоположных берегов возникают зоны ускорения и замедления течения. На пологих и развитых излучинах происходят размыв выпуклого берега в верхнем их крыле и аккумуляция наносов у вогнутого; в привершинной части излучин и ее нижнем крыле наблюдается обратная ситуация. На крутых излучинах фронт размыва охватывает вогнутые берега по всей их привершинной части, захватывая прилегающие крылья излучин. Соответственно, на излучинах происходит вдоль каждого берега последовательное чередование зон размыва и аккумуляции наносов – формирования побочней и отмелей [12], вследствие чего излучины русла смещаются как в продольном, так и поперечном направлениях по отношению к оси днища долины.

Любой остров, начиная от элементарного и заканчивая пойменным массивом, является причиной рассредоточения стока по рукавам, определяя условия размыва берегов и аккумуляции наносов в них. При этом оказывают влияние пропускная способность рукавов, уклоны и углы подхода потока к узлам разветвления или слияния рукавов. Вместе с тем поток, огибая остров, образует изгибы обоих рукавов либо одного из них, по существу – их излучины с соответствующим полем скоростей и положением зон размыва и аккумуляции наносов. Образование зон ускорения и замедления течений в разветвлениях имеет схожий характер с излучинами. Распределение скоростей течения и циркуляционных течений обуславливает размыв оголовков островов и берегов в нижней части рукавов, тогда как у

противоположных острову берегов на заходе в рукав и в ухвостье островов происходит аккумуляция наносов [15]. Определенное влияние на условия размыва берегов оказывает половодье, во время которого при затопленной пойме возникает взаимодействие пойменного и руслового потоков, вызывая слив осветленной воды с поймы в русло, что способствует активизации деформаций на излучинах, образованию прорванных излучин, развитию рукавов. Отток воды на пойму или в пойменные протоки приводит к затуханию русловых деформаций, обмелению рукавов и т.д.

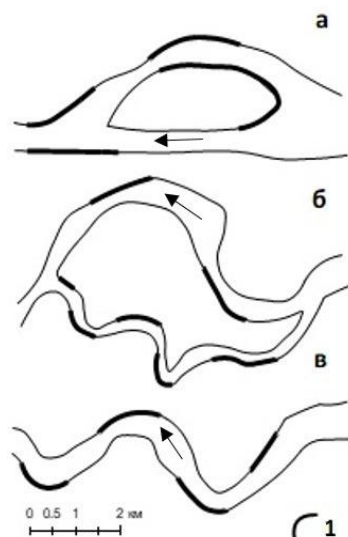


Рис. 2. Расположение фронта размыва берегов (1): а – в одиночном разветвлении; б – в пойменно-русловом разветвлении; в – на излучинах русла
 Fig. 2. The location of the shore erosion (1): а - in single branching; б - in flood plain-channel branching; в - at the bends of the channel

На широтном участке средней Оби излучины русла, основных рукавов раздвоенного русла и рукавов разветвлений, имеющие разную степень развитости, распределились по типам русла (рис. 3). Пологие излучины ($l/L=1,1\div 1,4$) преобладают среди излучин меандрирующего русла (44%); часто они встречаются в рукавах пойменно-русловых разветвлений (27%); реже (6–8%) – в новом спрямляющем русле прорванных излучин, рукавах сопряженных, одиночных и сложных трехрукавных разветвлений. Развитые излучины ($l/L=1,4\div 1,7$) характерны для извилистых рукавов сложных трехрукавных (46%) и пойменно-русловых разветвлений (36%); реже (9%) они встречаются в меандрирующем русле, однако образуют и старое русло прорванных излучин. Крутые излучины ($l/L=1,7\div 2,0$) характерны только для рукавов пойменно-русловых разветвлений (100%). Излучины с $l/L > 2,0$ (очень крутые и петлеобразные) распределились в равных долях между сложными трехрукавными разветвлениями и старым руслом прорванных излучин (по 50%).

Среднюю Обь на широтном участке можно разделить на пять участков: А) до истока Юганской Оби; Б) от истока до устья Юганской Оби; В) от устья Юганской Оби до истока Большой Салымской протоки; Г) от истока до устья Большой Салымской протоки; Д) от истока протоки Неулева до устья Иртыша (рис. 1). Ответвления рукавов раздвоенного русла забирают значительную часть стока Оби: Юганская Обь – 19% в истоке, далее ее водность возрастает до 40% в устье (с учетом того, что в нее впадает р. Большой Юган), Большая Салымская протока – 31–33%, протока Неулева – 20–30%. Водность всех вторых рукавов раздвоенного русла увеличивается к устью за счет перетока воды из правого основного рукава Оби по пойменным протокам.

Гидрология

Размывы берегов на широтном участке средней Оби и их связь с морфологией русла

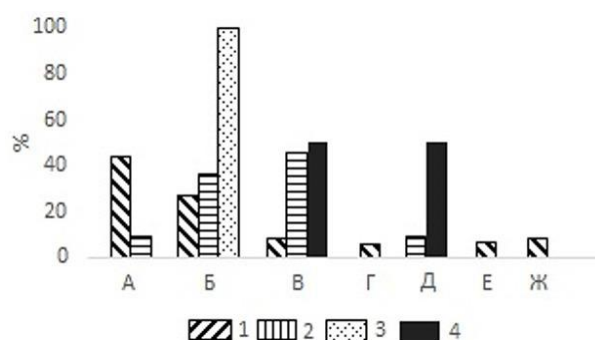


Рис. 3. Встречаемость излучин основных рукавов раздвоенного русла, рукавов разветвлений разных типов на широтном участке средней Оби: 1 – пологих, $l/L=1,1\div 1,4$; 2 – развитых, $l/L=1,4\div 1,7$; 3 – крутых, $l/L=1,7\div 2,0$; 4 – петлеобразных, $l/L>2,0$. А – излучины русла; Б – излучины рукавов пойменно-русловых разветвлений; В – излучины рукавов сложных трехрукавных разветвлений;

Г – прорванные излучины (новое русло); Д – прорванные излучины (старое русло);

Е – излучины рукавов сопряженных разветвлений, Ж – излучины рукавов одиночных разветвлений

Fig.3. The occurrence of bends of the main channel and bends of braided channels in the latitudinal section of the middle Ob: 1 – meander bends with high radius of curvature, $l/L=1.1\div 1.4$; 2 – developed meander bends, $l/L=1.4\div 1.7$; 3 – meander bends with low radius of curvature, $l/L=1.7\div 2.0$; 4 – loop-shaped meander bends, $l/L>2.0$. A – channel bends; Б – bends of flood plain-channel branching; В – bends of complex three-channel branching; Г – broken bends (new channel); Д – broken bends (old channel); Е – bends of conjugate branches, Ж – bends of single branches

Для всего широтного участка средней Оби и для каждого из выделенных участков были построены графики зависимости средней (C_{cp}) и максимальной (C_{max}) скоростей размыва берегов от степени развитости излучин русла и рукавов разветвлений (l/L) (рис. 4), которые дифференцировались вне зависимости от типа русла, но в соответствии с формой излучин: пологие ($l/L=1,1\div 1,4$), развитые ($l/L=1,4\div 1,7$) и крутые ($l/L > 1,7$) [12].

Во всех случаях скорости размыва растут по мере увеличения l/L излучин, причем для средних и максимальных скоростей их зависимость от степени развитости группировка точек на графиках и сами связи одинаковы. Коэффициенты в уравнениях связи $C_{cp(max)}=f(l/L)$ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты в уравнениях связи $C_{cp}=f(l/L)$ и $C_{max}=f(l/L)$ для излучин русла средней Оби
The coefficients in the equations of the connection $C_{av}=f(l/L)$ and $C_{max}=f(l/L)$ for the bends of the middle Ob

Участок (рис. 1)	№ группы (рис. 4)	C_{cp}			C_{max}		
		a	b	R^2	a	b	R^2
Обь от границы ХМАО до устья Иртыша	I	7,1	11,7	0,91	18,1	35,1	0,71
	II	11,4	15,4	0,89	15,1	18,4	0,76
	III	–	–	–	–	–	–
А	I	4,9	6,5	0,88	9,7	8,8	0,99
	II	6,2	5,5	0,82	–	–	–
	III	–	–	–	–	–	–
Б	I	–10,5	16,9	0,82	–	–	–
	II	–5,9	9,3	0,41	–	–	–
В*	–	–	–	–	–	–	
Г	I	4,9	3,1	0,79	10,9	8,8	0,95
Д	I	20,0	23,3	0,61	64,2	66,5	0,95
	II	22,4	22,3	0,71	37,0	44,8	0,87

*Для участка В зависимости не определялись вследствие его малой протяженности.

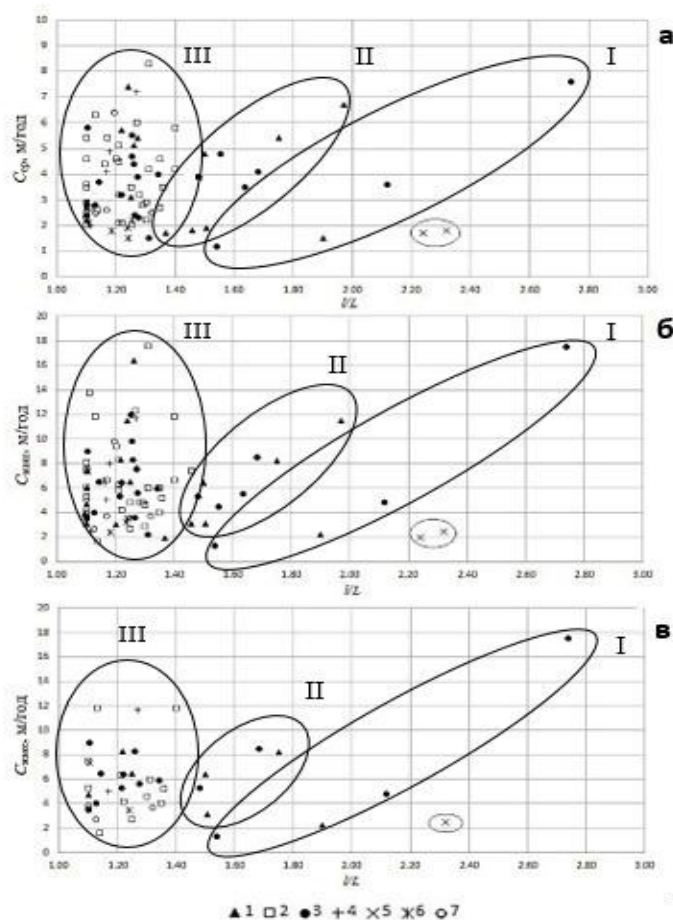


Рис. 4. Зависимость средней (а) и максимальной (б) скоростей размыва берегов ($C_{ср(макс)}$, м/год) для всего широтного участка и максимальной (в) для его верхней части А от степени развитости (l/L) излучин меандрирующего русла, основных рукавов раздвоенного русла и рукавов разветвлений разного типа: 1 – пойменно-русловые разветвления; 2 – излучины русла; 3 – сложные трехрукавные разветвления; 4 – прорванные излучины (новое русло); 5 – прорванные излучины (старое русло); 6 – сопряженные разветвления; 7 – одиночные разветвления. I – крутые; II – развитые; III – пологие

Fig. 4. The dependence of the average (a) and maximum (б) shore erosion rates ($C_{av(max)}$, m/year) for the whole latitudinal section and maximum (в) for its upper part A on the degree of development (l/L) of the meandering channel bends, bends of the main channel and bends of the braided channel. 1 – bends of flood plain-channel branching; 2 – channel bends; 3 – bends of complex three-channel branching; 4 – broken bends (new channel); 5 – broken bends (old channel); 6 – bends of conjugate branches, 7 – bends of single branches. I – meander bends with low radius of curvature; II – developed meander bends; III – meander bends with high radius of curvature

Все точки на графике объединяются в три группы, соответствующие пологим (III), развитым (II) и крутым (I) излучинам русла или рукавов (рис. 4а). Группа точек I соответствует крутым излучинам ($l/L > 1,7$), которые образуют рукава пойменно-русловых и сложных трехрукавных разветвлений. Их описывает уравнение $C_{ср} = 7,1l/L - 11,7$. В группу II входят развитые излучины ($l/L = 1,4 \div 1,7$) рукавов пойменно-русловых и сложных трехрукавных разветвлений (уравнение $C_{ср} = 11,4l/L - 15,4$). Самая многочисленная группа III объединяет преимущественно пологие излучины ($l/L < 1,4$) выше ответвления Юганской Оби (участок А на рис. 1), излучины основного рукава раздвоенного русла и рукавов русловых разветвлений любого типа. Их бессистемное расположение и отсутствие связи определяются слабой развитостью циркуляционных течений и дифференциацией скоростного поля в излучинах этого типа на зоны ускорения и замедления течения. В этих условиях размывы берегов зависят от местных условий: расположения побочней и осередков, сопряжения

излучин со смежными формами русла, оттока воды в пойму и слива воды с ней во время половодья, ответвления пойменных проток или слияния с ними и т.д.

Особо выделяются старые русла в прорванных излучинах (их всего три). Они характеризуются снижением темпов деформаций при увеличении степени развитости излучин, и при $l/L > 2,0$ отмечаются самые низкие скорости размыва берегов. Это обусловлено тем, что водность старого уже спрямленного русла невелика (не более 10–15%), русловые процессы в нем затухают, и со временем связь его с рекой может прекратиться.

Аналогичные зависимости были получены для максимальной скорости ($C_{\text{макс}}$, м/год) (рис. 4б): для излучин группы I – $C_{\text{макс}} = 18,1l/L - 35,1$, группы II – $C_{\text{макс}} = 15,1l/L - 18,4$. Для пологих излучин зависимость $C_{\text{макс}} = f(l/L)$ также отсутствует. Очевидно, что полученные зависимости скорости размыва (отступания) берегов на излучинах с разной степенью развитости (l/L) свидетельствуют об изменении механизма их развития при переходе от пологих излучин к развитым и от развитых к крутым, отражая последовательную смену продольного смещения продольно-поперечным и поперечным. Подтверждение этого можно найти в работе И.В. Попова [7], обнаружившего при изучении материалов по многим меандрирующим рекам затухание русловых деформаций при достижении l/L значения выше 1,4, и в теоретических положениях А.Я. Миловича [6] и Н.И. Маккавеева [5], объяснивших это явление с позиции гидравлической выгоды извилистой формы русла и потерь напора.

В качестве примера зависимости максимальной скорости отступания берегов ($C_{\text{макс}}$, м/год) от степени развитости излучин (l/L) на отдельных участках средней Оби приведен график для участка реки выше истока Юганской Оби (рис. 4в). Развитые и крутые излучины здесь разделяются на две группы. Группа I объединяет излучины меандрирующих рукавов пойменно-русловых и сложных трехрукавных разветвлений, для которых $C_{\text{макс}} = 3,4l/L - 3,1$. Несмотря на высокую степень развитости излучин максимальные скорости размыва берегов невелики, так как квазиравномерное развитие здесь получают оба или все три рукава, а сток воды в них сосредоточивается в соотношении 1:1,7 или 1:1,6:4,9. Лишь на одной излучине с $l/L > 2,74$ и петлеобразной формой отмечены наибольшие скорости размыва вогнутого берега, имеющие экстремальные для Оби значения (около 18 м/год). К группе II принадлежат развитые и крутые излучины в рукавах с превалирующей водностью в пойменно-русловых и сложных трехрукавных разветвлениях; для них $C_{\text{макс}} = 9,2l/L - 7,7$. Также выделяется группа III пологих излучин русла, рукавов и изгибов потока возле островов, для которых зависимость $C_{\text{макс(ср)}} = f(l/L)$ отсутствует.

Другим важным морфологическим параметром, определяющим структуру потока на излучинах, является радиус кривизны. Однако, поскольку он не является безразмерной характеристикой, то, в отличие от l/L , его анализ, как условия размыва берегов, проводится лишь по участкам, в пределах которых водность реки сохраняется неизменной, т.к. $r = f(Q)$. При увеличении радиуса кривизны (это соответствует уменьшению степени развитости – излучина становится более полой) происходит снижение средней и максимальной скоростей размыва берегов, так как при большем радиусе кривизны русла ослабевают поперечная циркуляция и скорости потока выравниваются по ширине русла. Коэффициенты в уравнениях связи $C_{\text{ср}} = f(r)$ для всех участков представлены в табл. 2.

Однако точки разделяются по группам здесь по-иному, чем при анализе $C = f(l/L)$. Так, на втором участке (от истока до устья Юганской Оби) (рис. 5а) каждая из двух групп соответствует разным морфодинамическим типам русла. Группа I объединяет излучины меандрирующего русла и изгибов основного по водности рукава в одиночных разветвлениях; они описываются уравнением $C_{\text{ср}} = -0,2r + 3,0$. Группа II представлена излучинами рукавов пойменно-руслового разветвления с водностью 15 и 67% и излучинами основных рукавов сопряженных разветвлений (их изгибами возле островов, образующих звенья разветвления). Они описываются зависимостью $C_{\text{ср}} = -1,5r + 9,8$. Очевидно, что различия в зависимостях

связаны с меньшей водностью рукавов по сравнению с неразветвленным руслом. Вне этих зависимостей расположились точки, соответствующие излучинам нового спрямляющего рукава ($l/L=1,2$; $r/h_{н}=2,8$) и старого русла ($l/L=2,0$; $r/h_{н}=3,4$) в прорванной излучине, а также извилина динамической оси потока, огибающей побочни, на прямолинейном отрезке ($l/L=1,1$; $r/h_{н}=3,1$).

Таблица 2

Коэффициенты в уравнениях связи $C_{cp}=f(r)$ и $L_{фр}=f(r)$ для излучин русла средней Оби
The coefficients in the equations of the connection $C_{av}=f(r)$ and $L_{er}=f(r)$ for the bends of the middle Ob

Участок (рис. 1)	№ группы	$C_{cp}=f(r)$			$L_{фр}=f(r)$		
		a	b	R^2	a	b	R^2
А	I	-2,0	14,9	0,98	2,0	3,7	0,92
	II	-0,7	9,8	0,97	2,6	3,3	0,97
	III	-2,6	9,0	0,98	5,6	5,2	0,75
	IV	-1,5	5,4	0,91	-	-	-
Б	I	-1,5	9,8	0,83	2,2	3,8	0,96
	II	-0,2	3,0	0,45	2,8	2,5	0,96
В	I	-1,7	7,1	0,96	3,2	2,0	0,91
Г	I	-2,8	13,7	0,95	-	-	-
	II	-1,3	6,5	0,88	-	-	-
Д	I	-2,6	13,1	0,94	1,9	-1,9	0,99
	II	-1,5	7,2	0,69	2,1	0,2	0,85

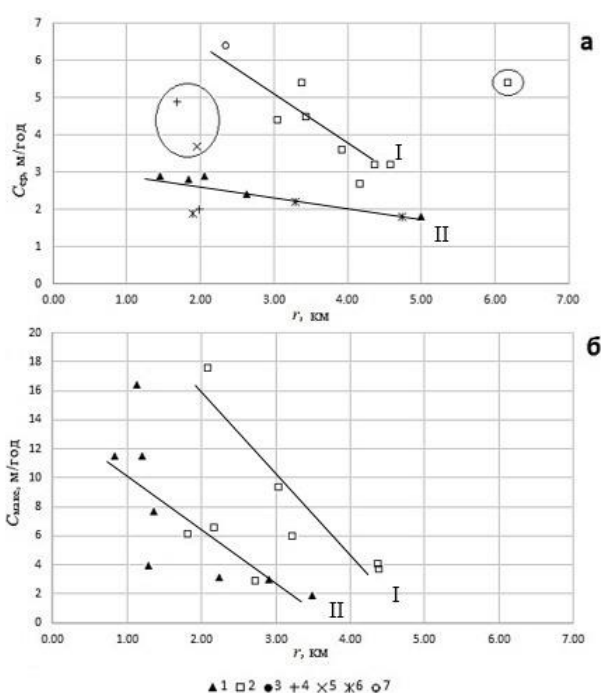


Рис. 5. Зависимость средней (а) и максимальной (б) скоростей ($C_{cp(max)}$, м/год) от радиуса кривизны (r , км) излучин меандрирующего русла, основных рукавов раздвоенного русла и рукавов разветвлений разного типа: а – участок Б от истока до устья Юганской Оби; б – участок Д от истока протоки Неулева до устья Иртыша. I, II – объяснение в тексте. Типы русла – см. подписи к рис. 4
Fig. 5. Dependence of average (a) and maximum (б) shore erosion rates ($C_{av(max)}$, m/year) on the radius of curvature (r , km) of the meandering channel bends, bends of the main channel and bends of braided channel: а – section B from the source to the mouth of the Yugan Ob; б – section Д from the source of the channel Neule to the mouth of the Irtysh river. I, II – explanation in the text. Types of channel – see captions to fig. 4

Гидрология

Размывы берегов на широтном участке средней Оби и их связь с морфологией русла

Аналогичная закономерность прослеживается при анализе зависимости максимальной скорости размыва берегов C_{\max} от радиуса кривизны русла (рис. 5б). На пятом участке (от истока протоки Неулева до устья Иртыша) выделяются две группы точек: I группа представлена излучинами меандрирующего основного рукава раздвоенного русла. В их вершинах располагаются истоки или устья пойменных проток. Для них $C_{\text{ср}} = -5,5r + 26,9$. Группа II характеризует размывы берегов преимущественно на излучинах рукавов пойменно-русового разветвления; зависимость описывается уравнением $C_{\text{ср}} = -3,9r + 14,2$.

Протяженность фронта размыва берегов, нормированная по длине береговой линии на излучинах или изгибах русла возле островов $L_{\text{фр}}/l_{\text{бер}}$, варьирует в широких пределах в зависимости от степени развитости излучин (l/L), сокращаясь при ее увеличении (рис. 6а, б).

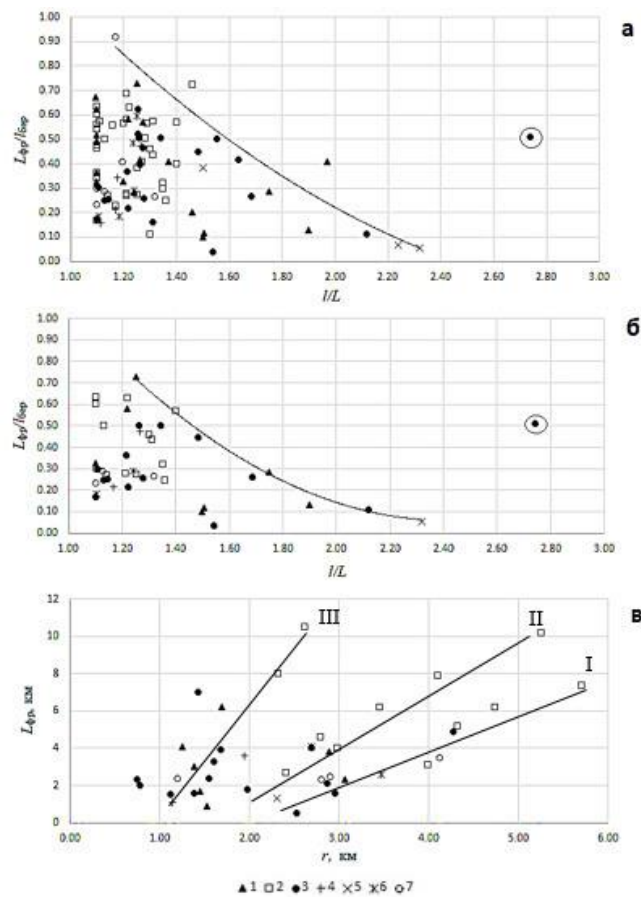


Рис. 6. Зависимость $L_{\text{фр}}/l_{\text{бер}}$ от степени развитости (l/L) (а,б) и $L_{\text{фр}}$ от радиуса кривизны (r , км) (в) излучин меандрирующего русла, основных рукавов раздвоенного русла и рукавов в разветвлениях разного типа:

I – крутые; II – развитые; III – пологие (а – Обь от границы ХМАО-Югры до устья Иртыша,

б,в – участок А от границы ХМАО-Югры до истока Юганской Оби). Типы русла – см. подписи к рис. 4

Fig.6. The dependence of $L_{\text{er}}/l_{\text{sh}}$ on the degree of development (l/L) (а, б) and L_{er} on the radius of curvature (r , km) (в) of the meandering channel bends, bends of the main channel and bends of the braided channel: I – the meander bends with low radius of curvature; II – developed meander bends; III – the meander bends with high radius of curvature.

(а - Ob from the border of the KMAO-Ugra to the mouth of the Irtysh river, б, в - section A from the border of the KMAO-Ugra to the source of the Yuganskaya Ob). Types of channel - see captions to Fig. 4

Верхняя огибающая поля точек для всего широтного участка средней Оби описывается полиномиальным уравнением $L_{\text{фр}}/l_{\text{бер}} = 0,24/L^2 - 1,54/L + 2,36$ (рис. 6а). На графике полученные точки группируются в зависимости от степени развитости излучин: $l/L < 1,6$ и $l/L > 1,6$. Диапазоны $L_{\text{фр}}/l_{\text{бер}}$ I группы ($l/L < 1,6$) составляют 0,04–0,92; II группы ($l/L > 1,6$) – 0,05–0,42, характеризуются снижением как максимальных (для всего исследуемого участка от 0,92 до

0,5), так и минимальных значений (от 0,15 до 0,04). Из пяти выделяемых участков явная связь $L_{\text{фр}}/l_{\text{бер}}$ наблюдается лишь на первом (от границы ХМАО-Югры до истока Юганской Оби), где Обь еще не разделяется на самостоятельные рукава, но только для крутых излучин с $l/L > 1,7$ (рис. 6б). На обоих графиках (рис. 6а, б) выделяется точка, соответствующая крутой петлеобразной излучине ($l/L=2,74$) одного из рукавов сложного трехрукавного разветвления. Большая протяженность фронта размыва берегов в этом случае, очевидно, связана с формой излучины. Она по существу представляет собой комбинацию из трех сегментных излучин, две из которых сформировались на ее крыльях, и одна (средняя) наследует привершинную часть исходной. Но это – единственная на исследуемом участке подобная излучина. Кстати, эта же излучина характеризуется экстремально большими скоростями размыва вогнутого берега (рис. 4): максимальная – около 18 м/год. Такие же скорости размыва берега (18 м/год) на крутой излучине ($l/L=2,54$) были зафиксированы на средней Оби выше по течению (перед устьем р. Кети у г. Колпашево) [13].

Снижение скорости размыва берегов при увеличении радиусов кривизны русла (рис. 5) происходит при одновременном увеличении протяженности фронта размыва берегов $L_{\text{фр}}$, что объясняется обратной зависимостью радиуса r от степени развитости излучины: $r \sim (l/L)^{-n}$ [10]. На графике $L_{\text{фр}}=f(r)$ для первого участка (рис. 6в) выделяются три зависимости, которые описываются уравнением вида $L_{\text{фр}}=ar-b$ (коэффициенты представлены в табл. 2): I – для пологих излучин ($l/L < 1,4$), II – для развитых излучин ($l/L=1,4 \div 1,7$), III – для крутых излучин ($l/L > 1,7$). В первых двух зависимостях преобладают излучины меандрирующего основного рукава, тогда как в третьей – излучины рукавов.

Связь средней и максимальной скоростей отступления берегов ($C_{\text{ср(макс)}}$, м/год) с протяженностью фронта размыва берегов ($L_{\text{фр}}$, км) показала ее неоднозначность: скорости могут как возрастать, так и снижаться при увеличении длины фронта размыва на разных участках Оби. Возрастание скоростей характерно для излучин рукавов разветвлений с $l/L > 1,4$. При петлеобразной форме $L_{\text{фр}}$ увеличивается. При этом скорости могут достигать очень высоких значений. Второй случай соответствует в основном пологим ($l/L < 1,4$) излучинам меандрирующего русла и основным рукавам раздвоенного русла.

Выводы

На широтном участке средней Оби, который характеризуется однородными условиями формирования русла (оно здесь широкопойменное, водность реки практически неизменная, русловой аллювий песчаный), размывы берегов распространены по всей его длине, создавая опасность при освоении приречных территорий, сопровождая постоянные переформирования русла. При этом скорости размыва и протяженность фронта размыва берегов не зависят от морфодинамического типа русла, определяясь, в первую очередь, степенью его извилистости. Определяющим фактором размывов берегов является извилистость потока, связанная на средней Оби с абсолютным преобладанием на реке излучин как самого русла, так и излучин основных рукавов раздвоенного русла (там, где от реки отходит Юганская Обь, Салымская протока и протока Неулева), рукавов пойменно-русловых разветвлений и изгибов потока возле островов в одиночных и сопряженных разветвлениях. У пологих излучин, у которых циркуляционные течения и неравномерность скоростного поля потока слабо выражены, и в относительно прямолинейном русле темпы размыва берегов зависят от местных условий, изменяясь в широких пределах; они возрастают при увеличении степени развитости излучин (изгибов потока) и снижаются с ростом радиуса их кривизны. Протяженность фронта размыва берегов имеет обратную зависимость по сравнению со скоростями, хотя в целом связь скорости и протяженности фронта размыва берегов неоднозначна.

Важной особенностью размыва берегов на излучинах в рукавах разветвлений является не только степень их развитости, обуславливающая интенсивность воздействия потока на

вогнутые берега, но и одновременное рассредоточение стока по рукавам. В то же время отвлечение части стока в рукава раздвоенного русла заметных изменений в этот процесс не вносит, так как оно сопоставимо с водностью многочисленных пойменных проток.

Библиографический список

1. Беркович К.М. Обь // Реки и озера мира: энциклопедия. М.: Энциклопедия, 2012. С. 479–498.
2. Герасимова А.С. Характеристика современных геологических процессов, развитых в долинах нижнего течения рек Оби и Иртыша // Вестник Московского ун-та. Сер. биология, почвоведение, геология, география. 1959. № 2. С. 103–111.
3. Камышев А.А., Рулёва С.Н., Чалов Р.С. Рассредоточение стока воды в разветвлениях русла средней Оби // Географический вестник = Geographical bulletin. 2017. №3(42). С. 48–53. doi 10.17072/2079-7877-2017-3-48-53.
4. Коркин С.Е., Исынов В.А. Многолетний мониторинг русловых деформаций реки Обь на примере ключевого участка «Усть-Вахский» // Эволюция эрозионно-русловых систем, её хозяйственно-экономические и экологические последствия, прогнозные оценки и учёт. Уфа: Аэтерна, 2017. С. 156–158.
5. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
6. Милович А.Я. Нерабочий изгиб потока жидкости // Бюллетень Политехнического общества. 1914. №10. С. 5–72.
7. Попов И.В. Деформация речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 328 с.
8. Третьцов Е.В. Деформации берегов р. Оби в Тюменской области // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 3. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. С. 276–284.
9. Третьцов Е.В. Размывы берегов рек в степном Алтае и его инженерно-геологическая характеристика // Бюллетень науч.-техн. информации. 1963. №8(52). С. 3–19.
10. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т.1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
11. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т.2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
12. Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излуины. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. 371 с.
13. Чалов Р.С., Сурков В.В., Рулёва С.Н., Беликов В.В., Завадский А.С. и др. Русловые процессы на р. Оби в районе г. Колпашево, размыв города, компьютерное моделирование потока и обоснование оптимального варианта защитных мероприятий // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 18. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. С. 205–243.
14. Чалов Р.С. Параметризация русловых процессов для прогнозных оценок и диагностики опасных проявлений // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. №5. С. 551–562.
15. Чалов Р.С. Русловые процессы (русловедение). М.: ИНФРА-М, 2017. 569 с.
16. Knighton A.D. Fluvial Forms and Processes: A New Perspective. London: Arnold, 1998. 383 p.
17. Schumm S.A. The fluvial system. New York: Wiley, 1977. 338 p.

References

1. Berkovich, K.M. (2012), «Ob'» in Danilov-Danil'yan, V.I., *Rivers and lakes of the world*, Entsiklopediia, Moscow, Russia, pp. 479–498.
2. Gerasimova, A.S. (1959), «Characteristics of modern geological processes developed in the valleys of the lower reaches of the Ob and Irtysh rivers», *Vest. Mosk. un-ta. Ser. biologiiia, pochvovedenie, geologiiia, geografiia*, pp. 103–111.

3. Kamyshev A.A., Ruliova S.N., Chalov R.S. Water flow spreading in the braided reach of the Ob river // *Geographical bulletin*. 2017. №3(42). p. 48–53. doi 10.17072/2079-7877-2017-3-48-53.
4. Korkin, S.E. and Isypov, V.A., (2017) «Long-term monitoring of channel deformations of the Ob river (case study Ust-Vakhsky)», *Evolution of erosion-channel systems, its economic and environmental consequences, forecast estimates and accounting*, Ufa, 2017, pp. 156–158.
5. Makkaveev, N.I. (1955), *Ruslo reki i eroziya v ee bassejne* [The river and erosion in its basin], Izd-vo AN SSSR, Moscow, Russia.
6. Milovich, A.Ia. (1914) «Non-working bend of the fluid flow», *Biull. Politekh. ob-va*, no.10, pp. 5–72.
7. Popov, I.V. (1965), *Deformatsiia rechnykh rusel i gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Deformation of river channels and hydraulic engineering], Gidrometeoizda, Saint-Petersburg, Russia.
8. Trepettsov, E.V. (1973), «Deformation of the banks of the Ob river in the Tyumen region», *Eroziya pochv i ruslovyie processy*, vol. 3, pp. 276–284.
9. Trepettsov, E.V. (1963), «Erosion of river banks in the steppe Altai and its engineering-geological characteristics», *Biull. nauch.-tekhn. Informatsii*, no.8(52), pp. 3–19.
10. Chalov, R.S. (2008), *Ruslovedenie: Teoriia, geografiia, praktika. Vol.1. Ruslovyie protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proiavleniia i usloviia formirovaniia rechnykh rusel* [Theory, geography, practice. Vol.1. Channel processes: factors, mechanisms, forms and conditions of channel formation], Izd-vo LKI, Moscow, Russia.
11. Chalov, R.S. (2011), *Ruslovedenie: teoriia, geografiia, praktika. Vol. 2. Morfodinamika rechnykh rusel* [Russian studies: theory, geography, practice. Vol.2. Morphodynamics of river channel], KRASAND, Moscow, Russia.
12. Chalov, R.S., Zavadskii, A.S. and Panin, A.V. (2004), *Rechnye izluchiny* [River meanders], Izd-vo MGU, Moscow, Russia.
13. Chalov, R.S., Surkov, V.V., Ruleva, S.N., Belikov, V.V., Zavadskii, A.S., Bondarev, V.P., Il'iasov, A.K., Krylenko, I.V., Krylenko, I.N. and Turykin L.A. (2012), «Channel processes on the river Ob in the Kolpashevo district of the city, the erosion of the city's computer modeling of flow and substantiation of the optimal variant of protective measures», *Eroziia pochv i ruslovyie protsessy*, vol. 18, pp. 205–243.
14. Chalov, R.S. (2017), «Parameterization of channel processes for predictive assessments and diagnostics of dangerous influence», *Vodnye resursy*, vol. 44, no.5. pp. 551–562.
15. Chalov, R.S. (2017), *Ruslovyie protsessy (ruslovedenie)* [Channel processes], INFRA-M, Moscow, Russia.
16. Knighton, A.D. (1998), *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*, Arnold, London, UK.
17. Schumm, S.A. (1977), *The fluvial system*, Wiley, New York, USA.

Поступила в редакцию: 03.07.2019

Сведения об авторах

Анна Александровна Куракова
магистрант кафедры физической географии
мира и геоэкологии, Московский
государственный университет им. М.В.
Ломоносова;
Россия, 119991, Москва,
Ленинские горы, 1

e-mail: a.a.kurakova@mail.ru

Роман Сергеевич Чалов
доктор географических наук, профессор
кафедры гидрологии суши, заведующий
научно-исследовательской лабораторией
эрозии почв и русловых процессов им. Н.И.
Маккавеева, Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова;
Россия, 119991, г. Москва,
Ленинские горы, 1

e-mail: rschalov@mail.ru

About the authors

Anna A. Kurakova
Master of Science, Department of World
Physical Geography and Geoecology,
Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Roman S. Chalov
Doctor of Geographical Sciences, Professor,
Department of Land Hydrology, Head of the
Makkaveev laboratory of soil erosion and fluvial
processes, Lomonosov Moscow State
University;
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Куракова А.А., Чалов Р.С. Размывы берегов на широтном участке средней Оби и их связь с морфологией русла // Географический вестник = Geographical bulletin. 2019. №3(50). С. 34–47. doi 10.17072/2079-7877-2019-3-34-47.

Please cite this article in English as:

Kurakova A.A., Chalov R.S. Shores erosion within latitudinal section of the middle ob and its correlation with morphology of the channel // Geographical bulletin. 2019. №3(50). P. 34–47. doi 10.17072/2079-7877-2019-3-34-47.