

## ВЕРИФИКАЦИЯ ОДНОГО ИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА РАЗМЫВА БЕРЕГОВ РЕК ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ВЕРХНЕЙ ОБИ

К.В. Марусин, А.В. Дьяченко, А.А. Коломейцев, А.А. Вагнер  
Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, E-mail: kat@iwep.ru

*Метод прогноза размыва берегов рек, представленный в «Рекомендациях по оценке и прогнозу размыва берегов равнинных рек и водохранилищ для строительства», верифицируется по данным десятилетних регулярных наблюдений на участке р. Обь в 50-ти километрах ниже г. Барнаула. Показано, что данный метод существенно занижает значение средней скорости отступления бровки берега. Результат верификации ставит под сомнение заявленный универсальный характер метода. Вопрос о его применимости требует дополнительного изучения.*

*Ключевые слова:* прогноз размыва берегов рек, отступление бровки берега, меандрирование, натурные наблюдения, Обь, Барнаул.

DOI: 10.24411/2410-1192-2020-15905  
Дата поступления 25.11.2020

В нормативно-методической литературе, используемой при проектировании различных объектов и мероприятий в руслах рек и в их прибрежной зоне, можно выделить два основных подхода к прогнозированию размыва берегов. Первый подход предполагает типизацию рассматриваемого участка русла, т.е. отнесение его к одному из известных типов руслового процесса (в терминологии [1]) или типов русла (в терминологии [2]). Затем, используя общие закономерности развития русла, характерные для данного типа, прогноз делается путем экстраполяции имеющихся ретроспективных данных о его конфигурации и рельефе [3-4]. При реализации этого подхода основной проблемой является наличие ретроспективных данных в достаточном для надежного прогноза количестве. На участках рек, где имеет место интенсивное судоходство, русло находится под постоянным контролем органов, обеспечивающих функционирование водного пути. В остальных же случаях регулярные и подробные данные об эволюции русла, как правило, отсутствуют. Ценным источ-

ником информации о развитии русла являются крупномасштабные топографические карты разных лет, но доступ к ним крайне ограничен. Данные же космической съемки стали поступать в широкий оборот лишь сравнительно недавно. Кроме того, в силу бесконечного разнообразия проявлений руслового процесса не всегда удается с достаточной определенностью отнести рассматриваемый участок русла к одному из известных типов.

Поэтому весьма притягательным для инженеров-практиков является иной, чисто детерминистический подход, представленный в [5]. Он заключается в использовании расчетных формул для определения величины отступления бровки берега за нужный период (или средней скорости ее отступления) в зависимости от морфологии поперечного сечения русла, параметров грунта, слагающего размываемый береговой склон, и характеристик гидрологического режима реки. Предложенные расчетные формулы *«отличаются простотой, не требуют большого объема полевых изысканий, а также данных об измене-*

нии берега за предшествующий период» [5, стр. 3]. Как указывают авторы, метод «применим на меандрирующих реках, имеющих половодье, при условии сложения берега аллювиальными породами и расположении его в непосредственной близости к основному меженному руслу реки» [5, стр. 3]. Никаких других условий, ограничивающих его применимость, не приводится. В данной статье метод прогноза размыва берегов рек, предложенный в [5], верифицируется по данным десятилетних регулярных наблюдений на участке реки Обь, расположенном у с. Барсуково, в 50-ти км ниже г. Барнаула, между устьями рек Касмала и Чумыш (рис. 1).

Все приводимые далее отметки высот уреза воды и рельефа русла даны в условной системе (усл.), ноль которой совпадает с нулем гидрологического поста Барнаул Росгидромета.

#### Метод прогноза размыва берега

В [5] величина отступления бровки размываемого берега реки ( $X$ , м) в выбранном расчетном створе за половодье одного конкретного года определяется следующей формулой:

$$X = k_1 k_2 k_3 \frac{\rho_w (H_{cp} + h_1)}{\rho (H + h_1)} (B - 2B_1) \quad (1)$$

где –  $k_1$  коэффициент асимметрии русла;  $k_2$  – коэффициент размываемости берега;  $k_3$  – коэффициент увлажнения грунтов берега;  $\rho_w, \rho$  – соответственно, плотность воды и грунта, слагающего береговой склон, т/м<sup>3</sup>;  $H_{cp}$  – средняя глубина русла, м;  $h_1$  – высота пика половодья, м;  $H$  – наибольшая глубина, м;  $h$  – высота берега, м;  $B$  – ширина русла, м;  $B_1$  – ширина части русла от линии наибольших глубин потока до размываемого берега, м.

Входящие в формулу (1) коэффициенты определяются следующим образом:

$$k_1 = [B_1 / (B - B_1)]^2 \quad (2)$$

$$k_3 = h_1 / h \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{1}{2h} [(h_1 - h_0) + (t_1/t)[h_0 - h_2]] \quad (4)$$

где  $h_0, h_2$  – высота уровня воды, соответственно, при вскрытии ледяного покрова и по окончании половодья, м;  $t_1$  – продолжительность подъема половодья от вскрытия реки до наступления пика половодья, сутки;  $t$  – продолжительность периода от вскрытия реки до окончания половодья, сутки.

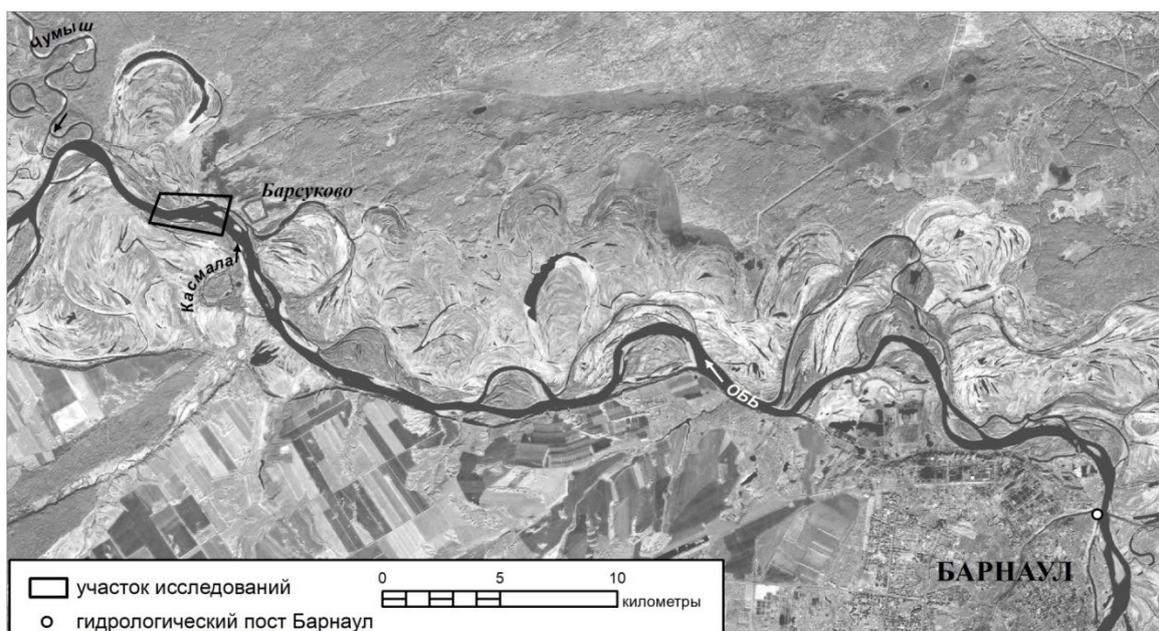


Рис. 1. Местоположение участка натуральных наблюдений за размывом берегов на р. Обь. Снимок спутника Landsat, дата съемки – 10 октября.2019 г.

При определении величины отступления бровки берега по формуле (1) за уровень отсчета входящих в нее параметров принят уровень воды 50 %-й обеспеченности в расчетном створе. Схема поперечного профиля русла с указанием этих параметров приведена на рисунке 2.

В силу значительной изменчивости гидрологического режима реки от года к году, формула (1) носит методический, оценочный характер, что признается и самими авторами. Она лишь демонстрирует общий подход к решению задачи.

С практической точки зрения для прогноза на среднесрочную перспективу (20 – 25 лет) важно иметь оценку средней многолетней скорости отступления бровки берега ( $X_{\text{ср}}$ , м/год). Для этого в [5] рекомендуется использовать следующую формулу:

$$X_{\text{ср}} = mq \frac{\rho_w (H_{\text{ср}} + h_1)}{\rho (H + h)} B \quad (5)$$

Фактически, формула (5) есть та же самая формула (1), в которой значения характерных высот и продолжительностей половодья ( $h_0, h_1, h_2, t, t_1$ ) относятся к средним многолетним величинам. Входящие в нее параметры  $m$  и  $q$  представляют собой произведения вида:

$$m = k_1 \left(1 - 2 \frac{B_1}{B}\right), \quad q = k_2 k_3 \quad (6)$$

#### Натурные наблюдения

Начиная с 2010 г. ежегодно на участке р. Обь, расположенном у с. Барсуково (протяженность – 2,8 км),

выполняется комплекс наблюдений за ходом руслового процесса. Сугубо практическая цель этого комплекса – обеспечение безопасности правобережной опоры высоковольтной линии электропередачи (ЛЭП) (рис. 3).

У с. Барсуково река Обь, текущая на северо-запад, поворачивает на запад, а затем возвращается на прежнее направление, образуя локальный изгиб русла. Участок натуральных наблюдений охватывает вершину и нижнее крыло этого изгиба. Значительная часть русла на участке занята областью относительно малых глубин – Барсуковским перекатом. Эта область простирается в виде гряды от правого берега к левому под острым углом к направлению течения. Вдоль правого берега, начиная от подножия склона переката, пролегает относительно узкая и глубокая плёсовая ложбина, которая постепенно расширяется вниз по течению. Соответственно, линия речного фарватера переходит от левого берега через седловину (перевал) переката к правому берегу, следует по правобережной ложбине и затем вновь возвращается к левому берегу. Пойма реки в рассматриваемом районе – двухсторонняя, широкая. Берега, в основном, крутые, местами обрывистые, возвышающиеся над меженным урезом воды на 3-4 м. На левом берегу в пределах участка прибрежная полоса покрыта плотными зарослями деревьев и кустарников. На правом берегу древесно-кустарниковые массивы более редкие, чередуются с обширными луговыми полянами.



Рис. 2. Схема поперечного профиля русла с указанием параметров, входящих в формулу (1)

Ежегодный комплекс работ на участке включает в себя рекогносцировочное обследование берегов, русловых форм и прилегающей территории пойменного массива, промеры глубин, трассировку пространственного положения бровки берегов и уреза воды навигационным GPS-приемником, а

также наблюдения за отступанием бровки правого берега реки в опорных створах (рис. 3б). Кроме того, в ходе работ выполняются измерения отметки уровня воды на временном посту свайного типа, расположенном на линии опорного створа № 1. Пост имеет привязку к Балтийской системе высот.

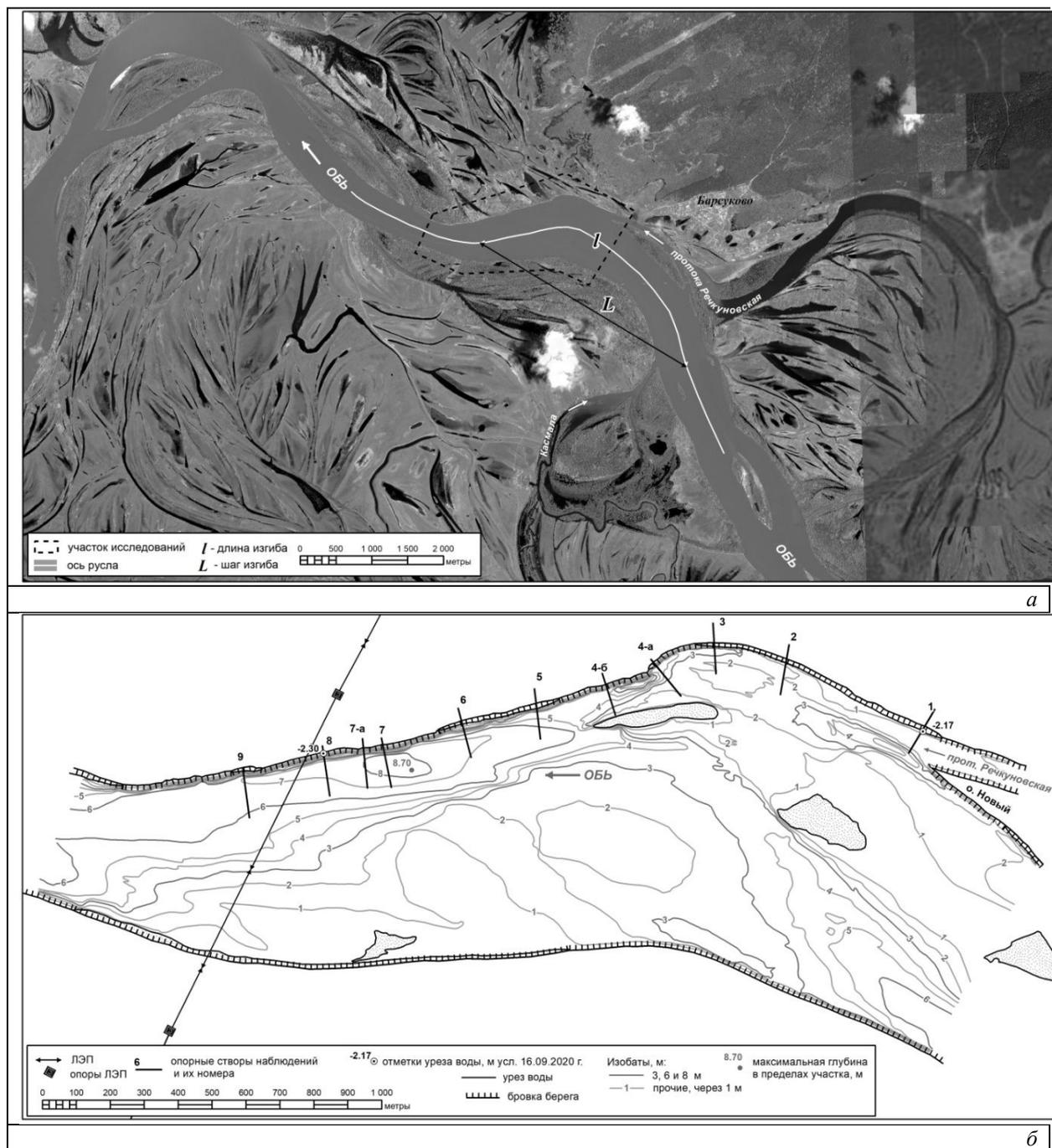


Рис. 3. Участок природных наблюдений на р. Обь у с. Барсуково:  
 а – общий вид участка - коллаж спутниковых снимков из коллекции Google Digital Globe, дата съемки – 03 июня 2013 г.; б – рельеф русла на участке по состоянию на сентябрь 2020 г.

Весь комплекс наблюдений проводился в течение двух дней, в один и тот же период времени (вторая декада сентября), т.е. в гидрологических условиях осенней межени. Поскольку в осенне-зимний период в силу относительной малости расходов воды русловые перестроения практически не происходят, результаты наблюдений отражают состояние русла на конец каждого года.

Помимо основного осеннего комплекса наблюдений ежегодно в период половодья (конец мая – начало июня) проводится предварительное рекогносцировочное обследование участка, в ходе которого также выполняются измерения уровня воды на временном посту.

По данным наблюдений правый берег от устья протоки Речкуновская до поворота береговой линии ниже створа перехода ЛЭП размывается и непрерывно отступает вглубь суши, причем интенсивность размыва нарастает вниз по течению. Левый берег на участке испытывает заметный размыв лишь в его верхней части – выше локального изгиба береговой линии. Остальной сегмент берега размывается весьма слабо. В центральной и нижней части сегмента бровку левого берега можно считать практически стабильной.

Подробное описание и анализ эволюции русла в целом на рассматриваемом участке выходят за рамки данной статьи. Здесь лишь отметим, что в зависимости от водности конкретного года и притока наносов с вышележащего участка реки нижний склон переката смещается то вниз, то вверх по течению. Например, в 2010 г. линия фарватера подходила к правому берегу между опорными створами № 6 и № 7 (см. рис. 3б), в 2011 и 2015 гг. точка подхода располагалась ниже створа перехода ЛЭП – в окрестности створа № 9, а в 2020 г. седловина переката заняла крайнее верхнее (по течению) положение за все время наблюдений. В ходе этих перемещений склона переката существенно изменяется конфигурация левобе-

режной отмели, правобережной ложбины и других элементов рельефа русла. Так площадь надводной части островка, расположенного у правого берега между створами № 3 и № 5 (см. рис. 3б), при одинаковой отметке уровня воды в 2014 г. составляла 39,4 га, а в 2019 г. – 7,5 га. Правобережная ложбина то заполняется наносами, то вновь промывается, однако как показывают наблюдения, глубины в ней постепенно уменьшаются. Можно сказать, что в нижней половине участка в окрестности створа перехода ЛЭП происходит медленное обмеление русла и его расширение.

К настоящему времени на участке развернуто 11 створов для наблюдения за отступанием бровки правого берега. Большинство из них было организовано в сентябре 2010 г. Створы № 4-а и № 4-б были устроены в 2011 г. взамен разрушенного первоначального створа № 4, а створ № 7-а – в 2012 г. Каждый створ закреплен на местности системой реперов. Два репера (основных) задают измерительную линию створа, перпендикулярную линии берега, остальные реперы (вспомогательные) служат для восстановления этой линии в случае утраты одного из основных реперов (рис. 4а).

Методика наблюдений достаточно проста. Две вешки устанавливаются на основных реперах опорного створа, определяющих его направление (рис. 4б), а затем в створе этих двух вешек мерной лентой (фибергласовой рулеткой длиной 50 м) измеряется расстояние по приблизительно горизонтальной линии от ближнего к берегу репера (базового) до бровки с точностью до 1 см (рис. 4в).

Разность значений текущего и прошлогоднего измерений дает величину отступления бровки берега в створе за год. При этом значения отступления, лежащие в пределах от 0,01 до 0,2 м (а также отрицательные), рассматриваются как нулевые, поскольку они находятся в пределах погрешности измерений. Эта

погрешность обусловлена, в основном, двумя факторами. Во-первых, негоризонтальностью линии измерения расстояний, поскольку это условие проверяется «на глаз». Во-вторых, неопределенностью в идентификации положения самой бровки берега. Не всегда на бровке имеется резкий перелом уклона поверхности суши, кроме того это место может быть закрыто травой или кустарником, а также завалено обломками деревьев. Тем не менее, как показывает опыт, сколько-нибудь значимые явления разрушения берега регистрируются данным методом вполне удовлетворительно. Результаты наблюдений за отступанием бровки берега в опорных створах представлены в таблице 1.

*Верификация метода прогноза размыва берега*



Рис. 4. Иллюстрации к методике наблюдений за отступанием бровки берега: а – схема опорного створа № 2; б – вешки на основных реперах створа № 4-а, вид в сторону реки; в – измерение расстояния от базового репера до бровки берега на створе № 3.

Таблица 1

Отступление бровки берега по линиям опорных створов за год, м

Створ	Год										Среднее, м/год	Сумма, м
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020		
1	0,00	0,00	0,63	0,00	0,99	0,00	1,65	0,74	0,00	0,00	0,40	4,01
2	1,70	2,70	2,04	0,00	1,23	1,20	0,36	0,85	1,15	0,00	1,12	11,23
3	2,43	1,10	3,39	3,30	2,35	3,25	1,97	5,37	0,73	0,72	2,46	24,61
4-а	–	0,00	2,63	0,00	0,00	2,40	0,00	3,90	4,24	4,86	2,00	18,03
4-б	–	0,00	0,95	0,95	1,10	0,50	1,35	0,67	0,95	2,20	0,96	8,67
5	0,00	0,00	1,55	3,45	1,50	1,45	1,22	1,93	0,00	0,00	1,11	11,10
6	0,00	0,45	0,64	1,63	1,13	1,33	1,57	1,10	0,00	0,96	0,88	8,81
7	1,02	2,10	2,50	5,78	0,70	5,55	0,00	1,58	0,50	0,70	2,04	20,43
7-а	–	–	1,03	3,33	1,24	3,90	1,75	1,91	6,80	0,00	2,50	19,96
8	0,00	4,85	4,05	9,35	2,04	7,40	2,16	6,89	6,09	1,39	4,42	44,22
9	3,24	0,00	13,47	0,00	5,35	8,60	5,13	3,64	6,33	1,22	4,70	46,98

Примечание: створы № 4-а и 4-б развернуты в 2011 г., створ № 7-а – в 2012 г.

Минимальное значение степени развитости ( $I/L$ ), необходимое для отнесения изгиба русла к излучине – 1,15 [7]. Присущие излучине морфологические элементы русла здесь также имеются: выпуклый размываемый левый берег в верхнем крыле изгиба, т.е. ниже устья р. Касмала, вогнутый размываемый правый берег в нижнем крыле изгиба, т.е. на участке наблюдений, а также пережат, пересекающий русло под углом от вершины изгиба к выпуклому берегу. Для свободной сегментной из-

лучины, находящейся на ранней стадии развития, характерно ее постепенное смещение вниз по течению, что предполагает размыв правого берега в нижнем крыле изгиба.

Поскольку необходимые условия применимости метода, изложенного в [5], выполняются, определим по формуле (5) среднемноголетнюю скорость отступления бровки берега реки Обь у правобережной опоры ЛЭП, расположив расчетный створ на линии опорного створа № 8 (рис. 5).

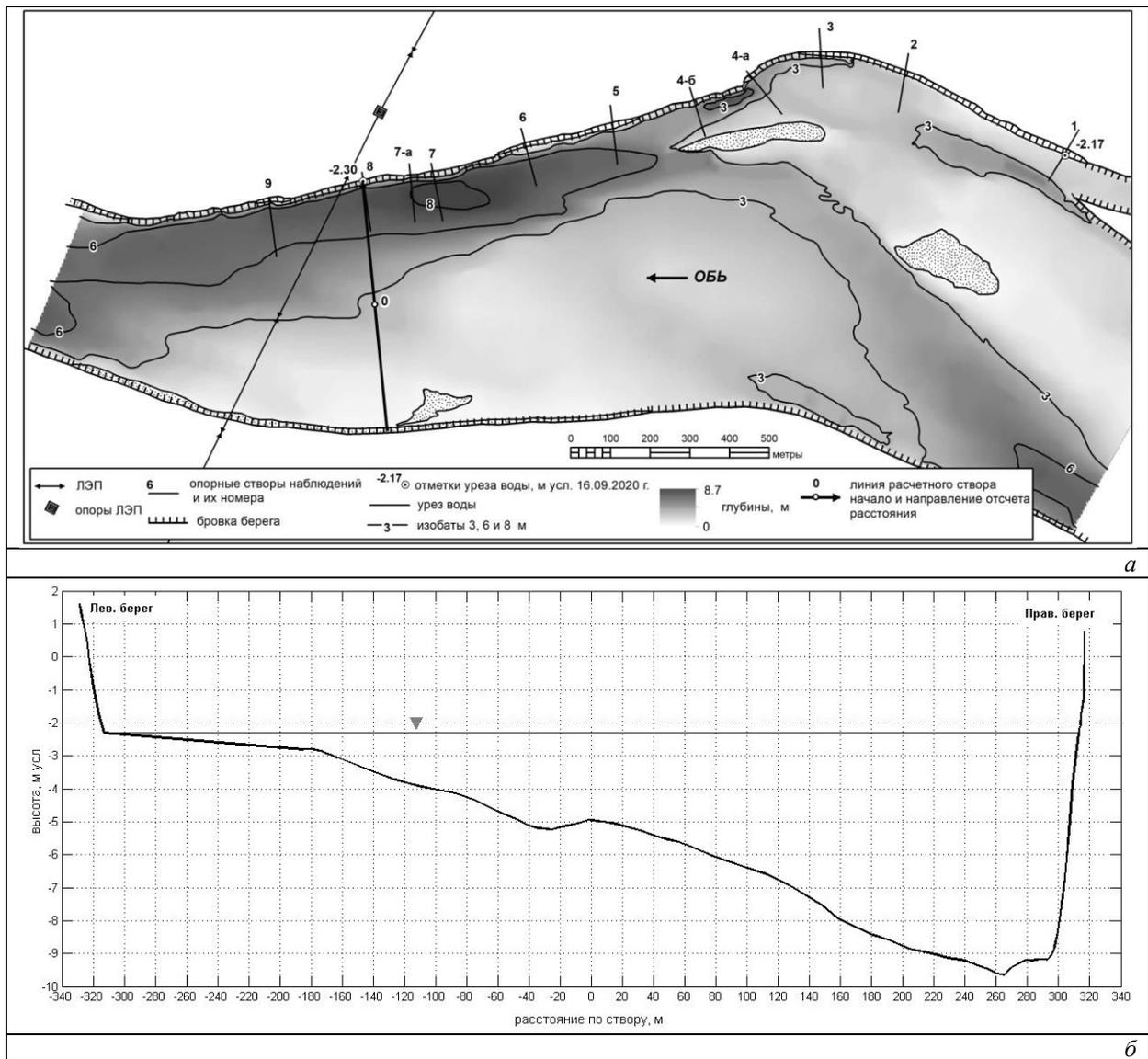


Рис. 5. Расчетный створ для определения среднемноголетней скорости отступления бровки берега:

а – местоположение створа; б – поперечный профиль русла в расчетном створе по результатам съемки, выполненной 16.09.2020 г.

Поскольку многолетние ежедневные гидрологические наблюдения за уровнями и расходами воды в расчетном створе, разумеется, не велись, для определения значений необходимых расчетных параметров придется воспользоваться данными ближайшего гидрологического поста Барнаул, расположенного в 50-ти км выше по течению реки (рис. 1). Вначале они будут найдены для этого поста, а затем с использованием данных наблюдений за уровнем воды на рассматриваемом участке будет сделан переход непосредственно к расчетному створу.

Интервал времени, на котором будут рассматриваться данные по посту Барнаул, примем равным общей продолжительности наблюдений за отступанием берега на опорном створе № 8. Створ был заложен 14 сентября 2010 г. Последнее наблюдение за отступанием бровки берега в этом створе произведено 15 сентября 2020 г. Таким образом, рассматриваемый период составил 10 лет.

Ежедневные данные о расходах и уровнях воды по гидрологическому посту Барнаул, а также о датах вскрытия реки, получены из [8-9]. Дата вскрытия

реки соответствует началу ледохода, пик половодья – дате максимального расхода воды. Моментом окончания половодья считается дата, когда интенсивное уменьшение расходов воды сменяется замедленным [10].

Значение уровня воды 50 %-й обеспеченности определялось по формуле эмпирической вероятности превышения гидрологической характеристики из [11]. Если ежедневные данные об уровне воды на посту Барнаул за выбранный интервал времени (2010-2020), общим числом 3626 (в источниках имеются некоторые пропуски), расположить в убывающем по значению порядке, то искомая величина 50 %-й обеспеченности будет лежать между 1813-м и 1814-м членами ряда. В данном случае значения обоих членов ряда совпадали и равнялись 1,04 м.

Значения параметров ( $h_0, h_1, h_2, t, t_1$ ) в формулах для расчета среднеемноголетней скорости отступления бровки берега (5, 6, 4, 3), определенные по данным гидрологического поста Барнаул на выбранном интервале времени, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения параметров в формулах для расчета среднеемноголетней скорости отступления по данным гидрологического поста Барнаул, 15.09.2010 – 15.09.2020 г.\*

Год	Вскрытие		Пик половодья		Окончание половодья		$t$ , сут.	$t_1$ , сут.	$h_0$ , м	$h_1$ , м	$h_2$ , м
	дата	уровень воды, м усл.	дата	уровень воды, м усл.	дата	уровень воды, м усл.					
2011	13.04	2,46	23.04	5,45	26.07	1,46	104	10	1,42	4,41	0,42
2012	10.04	1,37	09.05	2,74	05.07	1,54	86	29	0,33	1,70	0,50
2013	12.04	2,95	30.06	5,56	20.07	3,51	99	79	1,91	4,52	2,47
2014	01.04	2,02	08.06	6,98	28.07	2,27	118	68	0,98	5,94	1,23
2015	14.04	1,85	05.05	6,03	08.07	2,85	85	21	0,81	4,99	1,81
2016	05.04	3,50	22.06	5,98	20.07	3,23	106	78	2,46	4,94	2,19
2017	12.04	2,84	23.05	5,46	01.08	1,82	111	41	1,80	4,42	0,78
2018	12.04	4,40	20.06	5,63	20.07	2,34	99	69	3,36	4,59	1,30
2019	11.04	3,97	08.06	4,63	28.07	1,79	108	58	2,93	3,59	0,75
2020	10.04	3,18	08.05	5,15	22.06	2,30	73	28	2,14	4,11	1,26
<i>Среднее значение</i>											
							99	48	1,81	4,32	1,27

Примечание: \* – отметка уровня воды 50 %-й обеспеченности – 1,04 м усл.

Между гидрологическим постом Барнаул и рассматриваемым расчетным створом нет крупных притоков. Следовательно, можно предполагать, что в расчетном створе общая продолжительность половодья ( $t$ ) и продолжительность фазы подъема воды ( $t_1$ ) – от вскрытия реки до наступления пика половодья совпадают со значениями, определенными для поста. Однако характерные отметки уровня воды для расчетного створа в принятой системе высот будут, очевидно, иметь иные, существенно меньшие, чем для поста, значения.

Как уже отмечалось выше, в течение всех 10-ти рассматриваемых лет на участке производились наблюдения за уровнем воды в р. Обь на временном посту, расположенном на линии опорного створа № 1 (рис. 5а), причем как в фазу межени, так и в условиях половодья. На рисунке 6 показана связь этих измерений с соответствующими значениями отметки уровня воды на посту Барнаул. Как видно из этих данных, перепад уровней между постами для различных гидрологических ситуаций весьма незначителен (в пределах 5 %,  $\pm 20$  см) варьирует около величины 4 м. Данный факт есть проявление фунда-

ментального свойства статистически устойчивого речного потока сохранять в пределах протяженного участка средний уклон водной поверхности при колебаниях расходов воды [12]. Примем, что для всех гидрологических ситуаций разность отметок уровней воды между постом Барнаул и временным постом в опорном створе № 1 постоянна и равна ее среднему значению из данных наблюдений – 4,01 м.

Расчетный створ расположен на 1600 м ниже по течению от временного поста (см. рис. 5а). О величине падения уровня воды на данном отрезке русла можно судить лишь по синхронным измерениям его отметок в расчетном створе и на временном посту, выполненным 16 сентября 2020 г. Разность отметок уровня составила 0,13 м. Очевидно, что полученное значение не является постоянным. Оно зависит от расходов воды и текущей конфигурации рельефа русла. Однако исходя из опыта, можно полагать, что изменчивость значения разности уровней невелика, не более  $\pm 10$  см. Поэтому, будем полагать полученное значение 0,13 м также постоянным для всех гидрологических ситуаций.

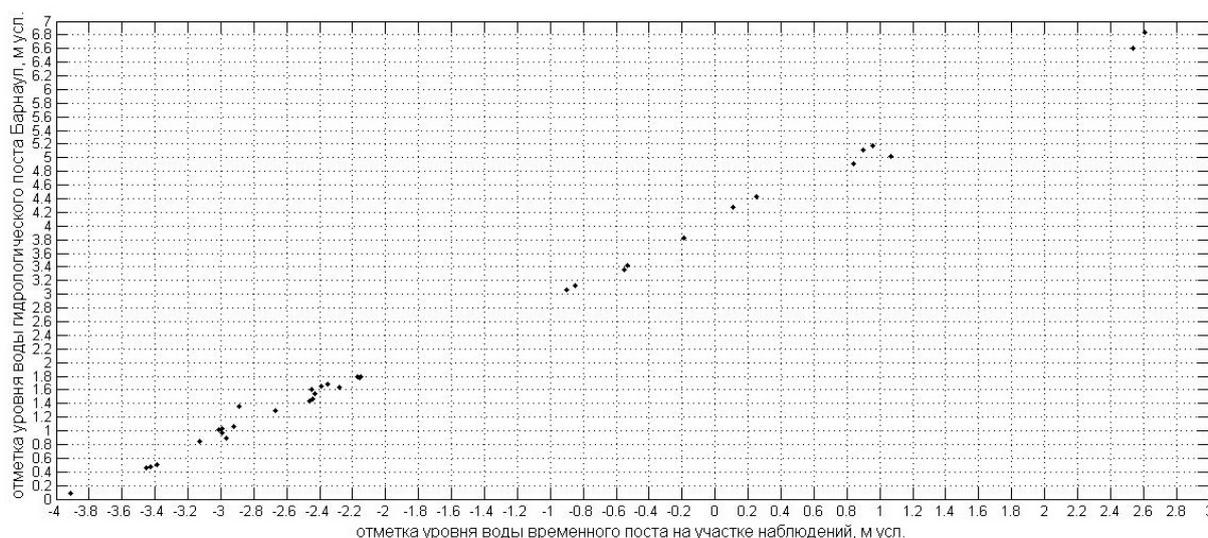


Рис. 6. Связь отметок уровня воды на участке наблюдений с соответствующими значениями на гидрологическом посту Барнаул

С учетом этих предположений уровень воды 50 %-й обеспеченности в расчетном створе равняется  $-3,1$  м в принятой условной системе высот. Поскольку параметры  $h_0, h_1, h_2$  суть разности отметок уровней воды, их значения для гидрологического поста Барнаул и расчетного створа будут одинаковыми. Значения расчетных параметров, характеризующих поперечный профиль русла в расчетном створе и зависящих от отметки уровня воды 50 %-й обеспеченности, приведены в таблице 3.

Грунт размываемого берегового склона в расчетном створе по своему составу неоднороден. Верхняя почти

отвесная часть склона (клиф) сложена сцементированным пористым суглинком, нижняя часть (от подножия клифа до уреза) – песком. В формуле (5) величина плотности грунта ( $\rho$ ) характеризует среднюю плотность, полученную для всего берегового склона. Для определения этого параметра из разных мест берегового склона в расчетном створе были отобраны 4 пробы грунта (рис. 7). Пробы отбирались и анализировались средствами полевой лаборатории Литвинова (ПЛЛ-9). Результаты определения плотности грунта приведены в таблице 4. Плотность воды примем равной  $1,0 \text{ т/м}^3$ .

Таблица 3

Значения параметров, характеризующих поперечный профиль русла в формулах для расчета среднесуточной скорости отступления бровки берега\*

Наименование	Обозначение	Значение
Ширина русла, м	$B$	471,34
Ширина части русла от линии наибольших глубин потока до размываемого берега, м	$B_1$	45,74
Наибольшая глубина, м	$H$	6,55
Площадь живого сечения потока, $\text{м}^2$	$S_w$	1534,13
Средняя глубина ( $S_w/B$ ), м	$H_{\text{ср}}$	3,25
Высота берега, м	$h$	3,89

Примечание: \* – отметка уровня воды 50 %-й обеспеченности в расчетном створе  $-3,10$  м усл.



Рис. 7. Размываемый береговой склон в расчетном створе:  
1-4 – точки отбора проб для определения плотности грунта.

Для окончательного расчета и дальнейшего анализа полученного результата представим формулу (5) в следующем виде:

$$X_{cp} = mqrpB,$$

$$\text{где } r = \frac{(H_{cp} + h_1)}{(H + h)}, p = \frac{\rho_w}{\rho} \quad (7)$$

Значения входящих в формулу (7) параметров ( $m, q, r, p$ ), вычисленные по данным из таблиц 2-4, а также полученное в итоге значение средней многолетней скорости отступления бровки берега ( $X_{cp}$ , м/год) приведены в таблице 5.

*Обсуждение результатов верификации*

Как видно из таблиц 1 и 5, полученный прогноз средней скорости отступления бровки берега (0,9 м/год), как минимум, в четыре раза меньше натурального значения для створа № 8 (4,4 м/год). Такая величина расчетной скорости размыва более характерна для сегмента берега в верхней части участка, чем для достаточно интенсивно размываемой зоны в окрестности перехода ЛЭП. Более правдоподобным, в свете имеющихся данных наблюдений, было бы значение примерно в 10 раз большее.

Следует отметить, что значение параметра  $m$ , описывающего асимметрию профиля русла, на порядок меньше величин всех остальных параметров (табл. 5). Вычислительная ошибка здесь

исключается, поскольку его величина была проверена по таблице значений функции  $m=f(B_1/B)$ , помещенной в [5].

В ходе расчетов был принят ряд допущений, однако по нашему мнению, они не могли существенно повлиять на полученный результат. Эти допущения затрагивали в основном гидрологические условия, а конечное значение, как видно из таблицы 5, определяется в основном величиной морфометрического параметра  $m$ . Были выполнены дополнительные расчеты, в которых значение уровня 50 %-й обеспеченности в расчетном створе варьировалось в пределах от -10 до +25 см от принятой первоначально величины. Однако они не привели к значимому изменению результата. Он существенно не меняется, даже если положить плотность грунта равную плотности воды.

Если исходить из физической сущности явления размыва, то чем больше асимметрия русла в сторону размываемого берега, т.е. чем меньше отношение  $B_1/B$  (см. рис. 2, 5), тем ближе стрежень потока подходит к береговому склону, и, тем более интенсивным должно быть его отступление. Однако значение параметра  $m$  с уменьшением величины  $B_1/B$  также уменьшается. Обратная зависимость, как видно из соответствующей таблицы, приведенной в [5], начинает проявляться только при значениях  $B_1/B$  больше или равных 0,38.

Таблица 4

Результаты определения плотности грунта берегового склона в расчетном створе

Номер и место отбора	Тип грунта	Плотность, т/м <sup>3</sup>
1 – клиф, верхняя часть	суглинок сухой	1,23
2 – клиф, средняя часть	суглинок сухой	1,40
3 – подножие клифа	песок речной сухой	1,41
4 – приурезовая полоса	песок речной влажный	1,45
<i>Среднее значение</i>		1,372

Таблица 5

Результаты расчета среднемноголетней скорости отступления бровки берега ( $X_{cp}$ ) по формуле (7)

$m$	$q$	$r$	$p$	$B, м$	$X_{cp}, м/год$
0,0093	0,3957	0,7251	0,7287	471,34	0,92

Таким образом, результаты проведенной верификации заставляют усомниться в универсальном характере методики прогноза размыва берегов равнинных рек, представленной в [5]. По

нашему мнению, вопрос о ее применимости вообще и в условиях Верхней Оби, в частности, должен быть подвергнут дополнительному изучению.

*Работа выполнена в рамках государственного задания (проект № 0383-2019-0003 «Изучение гидрологических и гидрофизических процессов в водных объектах и на водосборах Сибири и их математическое моделирование для стратегии водопользования и охраны водных ресурсов») и при финансовой поддержке гранта РФФИ «Прогнозирование опасных гидрологических ситуаций на участках речных водозборов на основе математического моделирования и натурных исследований русловых процессов (на примере реки Обь у г. Барнаула)» (19-41-220001).*

#### *Список литературы*

1. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сنيщенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 272 с.
2. 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.
3. Рекомендации по размещению и проектированию рассеивающих выпусков сточных вод. – М.: Стройиздат, 1981. – 224 с.
4. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтепроводов). ВСН 163-83. – М., 1985.
5. Рекомендации по оценке и прогнозу размыва берегов равнинных рек и водохранилищ для строительства. – М.: Стройиздат, 1987. – 72 с.
6. Русловые процессы на реках Алтайского региона. – М.: Изд-во МГУ, 1996. – 244 с.
7. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2: Морфодинамика речных русел. – М: КРАСАНД, 2011. – 960 с.
8. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России / ГИС-портал Центра регистра и кадастра [Электронный ресурс]. – URL: <http://gis.vodinfo.ru>.
9. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс]. – URL: <https://gmvo.skniivh.ru>.
10. Владимиров А.М. Гидрологические расчеты: учеб. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 366 с.
11. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003 / Госстрой России. – М., 2004. – 75 с.
12. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков: учеб. – М.: Транспорт, 1990. – 320 с.

#### *References*

1. Kondratyev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. Osnovy gidromorfologicheskoy teorii ruslovogo protsessa – L.: Gidrometeoizdat, 1982. – 272 s.
2. Chalov R.S. Ruslovedeniye: teoriya, geografiya, praktika. T. 1: Ruslovye protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel. – M.: Izd-vo LKI, 2008. – 608 s.
3. Rekomendatsii po razmeshcheniyu i proyektirovaniyu rasseivayushchikh vypuskov stochnykh vod. – M.: Stroyizdat, 1981. – 224 s.

4. Uchet deformatsy rechnykh rusel i beregov vodoyemov v zone podvodnykh perekhodov magistralnykh truboprovodov (nefteprovodov). VSN 163-83. – M., 1985.
5. Rekomendatsii po otsenke i prognozu razmyva beregov ravninnykh rek i vodokhranilishch dlya stroitelstva. – M.: Stroyizdat, 1987. – 72 s.
6. Ruslovye protsessy na rekakh Altayskogo regiona. – M.: Izd-vo MGU, 1996. – 244 s.
7. Chalov R.S. Ruslovedeniye: teoriya, geografiya, praktika. T. 2: Morfodinamika rechnykh rusel. – M: KRASAND, 2011. – 960 s.
8. Informatsionnaya sistema po vodnym resursam i vodnomu khozyaystvu basseynov rek Rossii / GIS-portal Tsentra registra i kadastra [Elektronnyy resurs]. – URL: <http://gis.vodinfo.ru>.
9. Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh obyektov (AIS GMVO) [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://gmvo.skniivh.ru>.
10. Vladimirov A.M. Gidrologicheskiye raschety: ucheb. – L.: Gidrometeoizdat, 1990. – 366 s.
11. Opredeleniye osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik. SP 33-101-2003 / Gosstroy Rossii. – M., 2004. – 75 s.
12. Grishanin K.V. Osnovy dinamiki ruslovykh potokov: ucheb. – M., 1990. – 320 s.

## VERIFICATION OF THE METHOD FOR PREDICTING RIVER BANK EROSION BY THE FIELD DATA COLLECTED IN THE OB RIVER UPPER REACH

K.V. Marusin, A.V. Dyachenko, A.A. Kolomeytsev, A.A. Wagner  
*Institute for Water and Environmental Problems of the SB RAS, Barnaul, E-mail: kat@iwep.ru*

*The method considered provides a set of simple equations to calculate the bank retreat value or rate of erosion depending on the channel cross-section parameters, hydrological conditions and coastal soil characteristics. It is declared that the method is applicable to low-land meandering rivers. The method is tested by the results of regular field observations of a river bank erosion process conducted in the meandering section of the Ob River over ten years. It is shown that the method underestimates a value of the mean annual bank retreat rate significantly.*

*Key words:* river bank erosion, river bank retreat, prediction of river bank erosion, predicting method, verification, meandering, field observations, Ob River upper reach.

*Received November 25, 2020*