

## МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 556.537+551.4.042

DOI: 10.15372/GIPR20220416

**В.В. КРАВЧЕНКО**

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, vk@irigs.irk.ru

### ОЦЕНКА ВЕРТИКАЛЬНЫХ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПО ГИДРОМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

*Рассматриваются методы расчета вертикальных русловых деформаций, базирующиеся на материалах гидрометрических наблюдений на сети постов Росгидромета. Оценивается метод, основанный на связях расходов воды с уровнями. Сделан вывод, что использование этого метода вызывает ряд серьезных затруднений и противоречий, не позволяющих применять его в массовых расчетах. Предложен метод оценки деформаций на основе низших отметок русла. Эти отметки рассчитываются по результатам промеров русла при регулярных измерениях расходов воды. Метод апробирован на 41 посту с площадью водосбора от 116 до 186 тыс. км<sup>2</sup> в бассейнах Ангары, Верхней Лены, Витима и оз. Байкал. Используются данные за весь период наблюдений продолжительностью от 35 до 80 лет — с 1943 по 2017 г. Вертикальные деформации отмечаются на всех постах без исключения. Их характерная амплитуда за период наблюдений составляет 50–150 см. На четверти постов это значение достигает 150–300 см. Тенденция деформаций разнонаправленная. В 41 % случаев отмечается размыв, в 39 % — намыв. На остальных постах тенденция не выражена. Выполненные расчеты и приведенные примеры их интерпретации показывают способность описанного подхода выявлять различные особенности процесса вертикальных деформаций русел рек. В частности, на его основе сделан вывод о связи между деформациями и расходами воды, когда один и тот же расход воды на малых реках может производить в десятки раз большую работу деформации ложа русла, чем на крупных реках.*

**Ключевые слова:** русла рек, вертикальные деформации, гидрометрические данные, методы расчета, связи расходов и уровней, низшие отметки русла.

**V.V. KRAVCHENKO**

V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, vk@irigs.irk.ru

### ASSESSMENT OF VERTICAL DEFORMATIONS OF RIVER CHANNELS BASED ON HYDROMETRIC DATA

*Methods for calculating vertical channel deformations based on hydrometric observations at the network of Roshydromet posts are considered. A method based on the relationship between water flow rates and levels is evaluated. It is concluded that the use of this method causes a number of serious difficulties and contradictions which do not allow its use in mass calculations. A method for assessing deformations based on using the lowest elevations of the channel is proposed. These marks are calculated from measurements of the channel simultaneously with the regular determination of water flow rates. The method was tested at 41 stations with a catchment area from 116 to 186 000 km<sup>2</sup> in the basins of the Angara, Upper Lena, Vitim, and Lake Baikal. The data were used for the entire observation period, with a duration of 35 to 80 years from 1943 to 2017. Vertical deformations are noted at all posts without exception. Their characteristic amplitude for the observation period is 50–150 cm. At one quarter of the posts, this value reaches 150–300 cm. The trend of deformations is multidirectional. In 41 and 39 % of cases, scouring and alluvium were observed, respectively. At the other posts, the trend is not pronounced. The calculations and the examples of their interpretation show the ability of the approach described to reveal various features of the process of vertical deformation of river beds. In particular, on its basis, it is concluded that there is a relationship between deformations and water*

*flow rates when the same water flow rate on small rivers can produce tens of times more work of deformation of the channel bed than on large rivers.*

**Keywords:** *river channels, vertical deformations, hydrometric data, calculation methods, relationships between water flow rates and levels, lowest elevations of channels.*

## ВВЕДЕНИЕ

Русловые деформации могут быть опасны для хозяйственной деятельности, так как вызывают осушение водозаборов, обмеление судовых ходов, разрушение гидротехнических и линейных сооружений и другие тяжелые последствия. Это определяет актуальность их исследования и необходимость прогноза.

Выделяют горизонтальные (перемещения русла в плане) и вертикальные (изменения высоты русла) русловые деформации [1, 2].

Наибольшие трудности возникают при исследованиях вертикальных деформаций из-за недостаточности данных и трудоемкости их получения. Если для изучения плановых деформаций могут использоваться многочисленные и доступные результаты аэрокосмических съемок и картографические материалы, то для выявления вертикальных изменений положения русла требуются детальные натурные изыскания, дорогостоящее лабораторное моделирование или разработка сложных математических моделей на основе большого количества трудноопределимых параметров [3, 4]. Это делает невозможным региональное изучение вертикальных деформаций русел рек для решения задач их зонирования и выявления закономерностей пространственного развития. В этой связи внимание исследователей направлено на поиск возможных источников информации о рассматриваемых процессах и разработку методов ее интерпретации.

В последние годы предпринимаются попытки привлечь для региональных расчетов вертикальных деформаций гидрометрические измерения на сети постов Росгидромета в гидрометрических створах. Источниками информации здесь являются результаты измерений расходов воды, включающие промеры русла.

Цель данного исследования — анализ существующих подходов и разработка предложений, позволяющих на основе данных Росгидромета объективно рассчитывать вертикальные русловые деформации при массовых исследованиях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Расчет вертикальных деформаций по зависимостям  $Q = f(H)$ .** Расчеты в работах [5–10] основаны на сравнении положения ежегодных зависимостей расхода воды ( $Q$ ) от уровня реки ( $H$ ) в конкретном створе. К.М. Беркович [9] считает, что главным гидрологическим признаком наличия направленных деформаций является относительное непостоянство кривых  $Q = f(H)$  на гидрологических постах за многолетний период.

Суть расчета сводится к следующему. В поле семейства ежегодных кривых  $Q = f(H)$  задается фиксированный расход, по которому определяются соответствующие ему уровни за каждый год  $H_{Q_i}$ , где  $i$  — кривая за определенный год (рис. 1). Разность  $H_{Q_i} - H_{Q_{(i+1)}}$  отражает значение деформации в  $i$ -м году.

При использовании такого приема возникают следующие затруднения.

1. Приращения уровня в результате сравнения кривых нельзя однозначно интерпретировать как размер деформаций в гидрометрическом створе. Обсуждаемая схема расчета справедлива только при небольшой изменчивости пропускной способности русла, т. е. относительной стабильности выше- и нижележащих участков реки [11, 12]. Смещение ежегодных кривых расходов может происходить не только из-за деформаций в створе, но и за счет деформаций выше- и нижележащих перекатов. Например, при размыве вышележащего переката уклон на участке гидрометрического створа уменьшается. Для пропуска расчетного расхода в этих условиях требуется более высокий уровень, и новая кривая поднимается вверх. Если ее сравнивать с прошлогодней кривой, то создается впечатление, что на гидрометрическом створе произошел намыв, хотя деформации здесь вполне могли и не происходить. Такая же ситуация возникнет и при других изменениях высотного положения перекатов. Смещение положения кривых в этом случае следует связывать главным образом с изменением гидравлических характеристик потока, а не с деформациями в гидрометрическом створе. В лучшем случае они лишь указывают на направленность этих деформаций, хотя, как будет показано ниже, это далеко не всегда так.

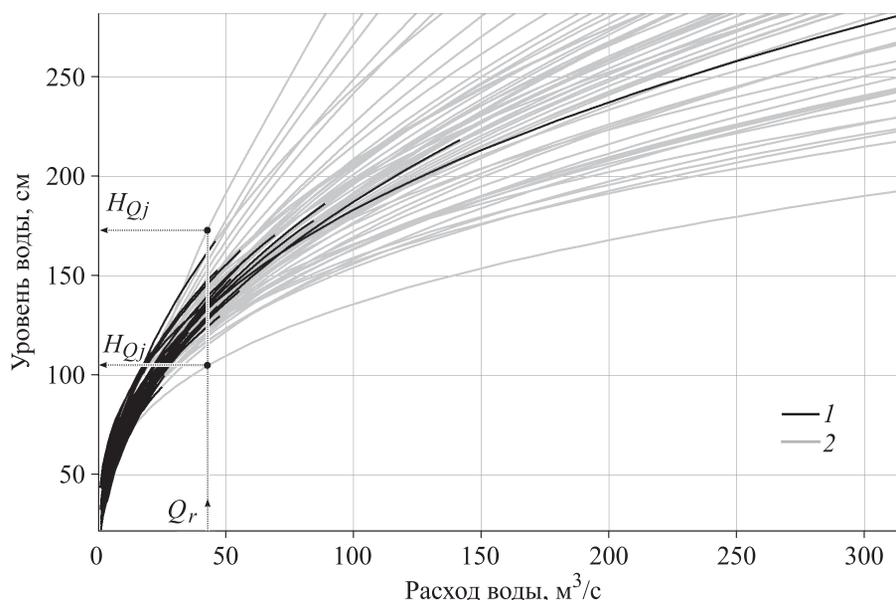


Рис. 1. Семейство кривых  $Q = f(H)$  для гидроствора на р. Олхе у д. Олха за 1943–2017 гг.

1 — кривые в пределах диапазона измерений; 2 — экстраполированные части кривых.

2. Расчет по кривым  $Q = f(H)$  будет корректным, если фиксированный расход находится в пределах освещенных измерениями частей всех кривых. На рис. 1 показан типичный пример совокупности кривых на р. Олхе у д. Олха. Лишь около 20 % кривых имеют диапазон измерений, в который попадает средний многолетний максимальный расход ( $42,7 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Для использования остальных кривых требуется их экстраполяция. И.Ф. Карасев [11] считает, что экстраполяцию кривых  $Q = f(H)$  за пределами диапазона их измерений следует делать только на гидравлической основе. Руководящий документ [13] устанавливает рамки гидравлической экстраполяции не более 15 % диапазона измерений уровня при расходах и полностью исключает интерполяцию по аппроксимирующей функции, например по степенной функции или полиному второй степени [14]. Гидравлическая экстраполяция требует множества дополнительной информации и поэтому для массовых расчетов не подходит. Расход, для которого соблюдается условие попадания в диапазон измерений всех кривых для рассматриваемого примера, равен  $5,62 \text{ м}^3/\text{с}$ , т. е. это меженный расход. По этой причине использовать для расчетов значения расходов при достижении потоком бровки берега в большинстве случаев нельзя.

3. Получаемое по кривым значение уровня не отражает действительного положения дна, а лишь позволяет сравнивать эти уровни между собой для получения представлений о направленности деформаций. На рис. 2 показаны результаты расчета таких уровней при различных фиксированных расходах. Как видно, графики примерно одинаковы и различаются только высотой положения. При этом нельзя считать ни один из графиков реально отражающим положение дна. При небольших расходах и небольшом количестве экстраполированных кривых (до 20 %) разности между значениями уровней соседних лет ( $\Delta H$ ) примерно одинаковы. По мере увеличения расчетного расхода и накопления ошибок в результате экстраполяции значения  $\Delta H$  у разных кривых начинают существенно различаться. Как видно на рис. 2, меняется даже тенденция деформации с отрицательной на положительную. В этих условиях дискуссия о выборе фиксированного расхода утрачивает смысл.

4. Анализ кривых расходов можно использовать только при свободном русле. Получить представления о том, что происходит в остальную, большую часть года, нельзя, хотя известно, что русловый процесс протекает также и при напорном движении подледного потока [15].

Перечисленные затруднения при использовании кривых  $Q = f(H)$  для расчета вертикальных русловых деформаций указывают, что к этому методу следует относиться с большой осторожностью. Результаты расчета в виде относительных изменений уровня делают обсуждаемый подход малоприменимым для строительного проектирования, оперирующего конкретными отметками дна русла.

**Расчет вертикальных деформаций по низшим отметкам дна реки.** Материалы гидрометрических измерений на постах Росгидромета содержат результаты промеров русла при измерениях расходов воды. Известны работы, в которых промеры используются для определения размеров и направленности вертикальных деформаций отдельных рек [16, 17].

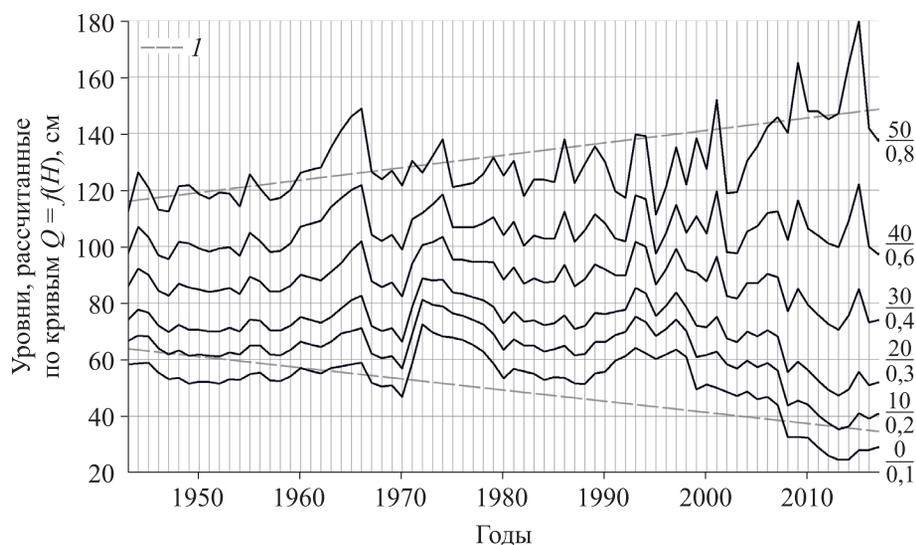


Рис. 2. Уровни, рассчитанные по кривым  $Q = f(H)$  при различных фиксированных расходах.

*I* — тенденции деформаций верхней и нижней кривых уровней. Справа на рисунке возле линий в числителе указано число экстраполированных кривых от их общего количества (%), в знаменателе — значение фиксированного расхода воды в долях от среднего многолетнего максимального расхода.

В качестве параметра для расчета деформаций нами выбрана наибольшая глубина потока, приведенная к абсолютным отметкам, т. е. низшие отметки русла  $H_{\min}$ . Ее выбор определялся следующими соображениями. Значение  $H_{\min}$  наиболее точно измеряется по сравнению с другими морфометрическими характеристиками потока, например со средней глубиной, которая рассчитывается по площади сечения и ширине реки между урезами воды. На реках с устойчивым ледоставом урезы в зимний период инструментально не определяются. Кроме того, это единственный параметр, который позволяет рассчитывать вертикальные деформации непосредственно по отметкам русла.

Источником информации служили результаты измерений расходов воды на постах Росгидромета. В последние годы эти данные были оцифрованы и помещены в Единый государственный фонд данных. Для обработки указанной информации и расчета русловых деформаций была разработана специальная компьютерная программа<sup>1</sup>, которая позволяет: конвертировать гидрометрическую информацию Единого государственного фонда данных в форматы общего пользования; рассчитывать гидравлико-морфометрические характеристики потока и строить их зависимости от уровня за заданные периоды по различным схемам аппроксимации; строить совмещенные профили по данным промеров за любой период времени; проводить расчеты вертикальных деформаций на основе кривых  $Q = f(H)$  и изменения отметок дна русла.

Для исследования выбирались гидрометрические створы, которые не переносились в течение всего периода наблюдений, а форма русла за этот период оставалась примерно одинаковой.

С позиций речной гидравлики [18] использование  $H_{\min}$  корректно, если форма живого сечения речного потока на протяжении периода исследований остается примерно одинаковой. В таком случае есть основания полагать, что вертикальные перемещения дна русла происходят в среднем параллельно и изменение низших отметок русла  $H_{\min}$  не связано с локальным размывом и может описывать значение этих перемещений. Параметр формы русла  $\beta_*$  определялся по предложенной Г.В. Железняковым формуле [19]:

$$\beta_* = \frac{1}{\sqrt{h_{\text{cp}}}} \int_0^B h^{3/2} db,$$

где:  $\beta_*$  — площадь сечения русла,  $h$  и  $h_{\text{cp}}$  — глубина и средняя глубина русла соответственно.

Среднее значение  $\beta_*$  для всех рек равно 1,05, для отдельных рек его значение изменяется в пределах 1,04–1,09. Исследованные реки имеют форму русла, приближающуюся к трапецидальной или

<sup>1</sup> Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020614182. Расчет вертикальных русловых деформаций по данным гидрометрических измерений / В.В. Кравченко; зарегистр. 26.03.2020.

Результаты расчета вертикальных деформаций русел некоторых рек в бассейнах Ангары, Верхней Лены, Витима и оз. Байкал по нижним отметкам их русел  $H_{\min}$  и по кривым  $Q = f(H)$  за весь период наблюдений до 2017 г.

Пост наблюдения	Год начала наблюдений	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Диапазон изменения коэффициента формы русла	Наибольшие изменения глубины русла за отдельный цикл размыва/намыва		Амплитуда отметок дна за период наблюдений, см		Общая тенденция деформаций	
				см	лет	по $H_{\min}$	по $Q = f(H)$	по $H_{\min}$	по $Q = f(H)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
р. Иркут – с. Тибельги	1956	11 600	1,03–1,08	5	-98	120	12	↓	→
р. Олка – д. Олка	1943	590	1,01–1,07	4	-59	80	29	↑↓	→
р. Кула – д. Грановщина	1961	7840	1,02–1,08	5	-27	33	18	→	→
р. Китой – пос. Дабалы	1971	3920	1,04–1,09	17	+170	170	29	↑	↑↓
р. Китой – г. Ангарск	1964	8420	1,03–1,09	4	-28	37	4	↓	↑↓
р. Тойсук – пос. Гальяны	1960	1070	1,02–1,07	6	-53	53	33	↑↓	→
р. Ида – д. Морозова	1956	2490	1,01–1,07	3	-101	114	25	↑↓	↑
р. Тунак – д. Чичкова	1962	812	1,06–1,09	3	-43	78	28	↓	↑↓
р. Ока – пос. Сарам	1975	18 700	1,03–1,07	7	-186	186	22	↑↓	↑↓
р. Ока – с. Усть-Када	1963	33 400	1,02–1,06	3	+65	86	27	↑↓	↑↓
р. Зима – пос. Зулумай	1948	2460	1,05–1,09	10	+84	84	21	↑	→
р. Ия – пос. Аршан	1958	5140	1,04–1,09	10	-223	223	31	↓	↑
р. Ия – г. Тулун	1938	14 500	1,03–1,09	4	-161	180	40	↓	→
р. Кирей – с. Уйгаг	1966	2950	1,04–1,08	5	-120	196	26	↓	→
р. Бадарма – пос. Средняя Бадарма	1975	1990	1,05–1,09	3	+59	68	25	↑	→
р. Карабула – с. Карабула	1951	4190	1,04–1,09	2	+74	82	31	↑	→
р. Ула – д. Укар	1951	17 200	1,03–1,09	3	+85	95	31	↑	→
р. Тагул – д. Георгиевка	1956	7940	1,03–1,09	4	-45	60	21	↓	→
р. Топорок – г. Алзамай	1948	1990	1,04–1,06	4	-118	118	24	↑↓	→
р. Пойма – с. Новая Пойма	1956	2390	1,07–1,09	3	-63	97	44	↑↓	↑
р. Лена – д. Чанчур	1956	4690	1,04–1,08	3	+53	73	17	↑	→
р. Лена – р. п. Качуг	1949	17 400	1,06–1,09	4	+95	105	11	↑	→
р. Лена – с. Макарово	1971	85 500	1,01–1,06	5	-221	221	12	↓	→
р. Иликтя – с. Большая Тарель	1956	1450	1,01–1,06	6	-66	66	22	↓	↑
р. Кула – д. Мука	1956	2220	1,07–1,09	3	-53	61	5	↓	↑
р. Таяра – с. Таяра	1956	5720	1,02–1,06	3	+47	50	21	↑	→
р. Ния – р. п. Звездный	1983	2300	1,04–1,07	3	+48	57	10	↑	→
р. Киренга – д. Шорохова	1951	46 500	1,02–1,05	5	-189	212	28	↓	↑
р. Витим – с. Усть-Заза	1961	14 200	1,01–1,07	4	+163	192	45	↑	→
р. Витим – с. Романовка	1948	18 200	1,02–1,08	2	±269	290	28	↑↓	↑
р. Витим – ГМС Хулугли	1962	48 500	1,03–1,08	2	+84	95	15	↑	→
р. Витим – г. Бодайбо	1948	186 000	1,02–1,05	8	+252	252	38	↑	→

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
р. Заза – с. Усть-Заза	1958	1880	1,04–1,09	2	-66	85	14	→	→
р. Бодайбо – р. п. Артемовский	1981	116	1,01–1,06	4	+92	102	54	←	←
р. Мама – р. п. Луговский	1970	18 400	1,03–1,09	2	-116	124	32	→	→
р. Голоустная – с. Большое Голоустное	1975	2260	1,01–1,06	4	+71	74	19	←	←
р. Бугульдейка – с. Большая Бугульдейка	1974	1700	1,02–1,08	2	+88	91	17	←	←
р. Анга – с. Еланцы	1961	727	1,03–1,07	7	-89	109	21	→	→
р. Снежная – д. Выдрино	1962	3000	1,01–1,07	4	+209	240	29	←	←
р. Хара-Мурин – пос. Мурин	1968	3000	1,03–1,08	7	-41	41	9	→	→
р. Утулик – пос. Утулик	1968	959	1,02–1,07	3	-84	124	33	→	←

Примечание. ↓ – размыв; ↑ – намыв; ↑↓ – тенденция не выражена.

параболическую. Реки с площадью водосбора более 30 тыс. км<sup>2</sup> имеют во всех случаях русла трапецеидальной формы. За многолетний период параметр β\* для конкретных рек колеблется незначительно от ±0,01 до ±0,03 (см. таблицу). Это говорит о том, что форма русла при вертикальных деформациях практически не изменяется и при их расчете можно ориентироваться на наибольшую глубину потока.

Всего в работе были использованы данные с 41 поста (площадь водосбора от 116 до 186 тыс. км<sup>2</sup>) за весь период наблюдений начиная с 1943 г. по 2017 г. (см. таблицу). В таблице приведены значения деформаций, рассчитанные по  $Q = f(H)$ . Расчеты выполнены для фиксированных расходов, выбранных в диапазоне измерений, когда не более 5 % кривых за отдельные годы являются экстраполированными. Эти значения равны 10–25 % от среднего многолетнего максимального расхода, что примерно соответствует среднему многолетнему межennaleму расходу. Для изменений отметок русла за отдельный цикл показано наибольшее значение из ветвей размыва или намыва (полуцикла) и приведена его продолжительность. Следует иметь в виду, что длительность этих ветвей может быть различной.

Расчет вертикальных деформаций по  $H_{min}$  показал, что они регистрируются на всех без исключения постах. Их характерная амплитуда за период наблюдений составляет 50–150 см (66 % всех постов). На четверти постов это значение достигает 150–300 см, и лишь на двух постах оно меньше 50 см.

Покажем, что в общем случае вертикальные деформации зависят от размеров реки. Для этого нормируем амплитуду деформаций, разделив ее на размер реки. В качестве меры последнего выберем средний многолетний максимальный годовой расход. Введем понятие модуля вертикальных деформаций как отношение их амплитуды к этому расходу. Тогда размерность модуля деформаций будет следующей: 1 см деформаций на 1 м<sup>3</sup>/с расхода реки.

На рис. 3 показана связь между модулем деформации и средним многолетним максимальным годовым расходом. По мере увеличения среднего годового максимального расхода модуль деформации резко уменьшается. Это происходит при расходах менее 100–200 м<sup>3</sup>/с, что соответствует площади водосбора меньше 1500–3000 км<sup>2</sup>. При дальнейшем увеличении размера реки интенсивность уменьшения модуля деформации снижается, и при расходах более 1000 м<sup>3</sup>/с (водосбор около 15 тыс. км<sup>2</sup>) его значение можно считать практически постоянным и равным 0,02–0,10 см на 1 м<sup>3</sup>/с. На малых водотоках с площадью водосбора 100–200 км<sup>2</sup> значение модуля деформаций достигает 7 см на 1 м<sup>3</sup>/с.

Приведенные данные и высокая связность зависимости (коэффициент корреляции равен -0,94), показанная на рис. 3, позволяют сделать вывод, что один и тот же расход воды на малых реках может производить в десятки раз большую работу вертикальной деформации ложа русла, чем на крупных.

На 17 из исследованных гидрометрических створов (41 % случаев) наблюдается направленность вертикальных деформаций к размыву. 16 постов (39 % случаев) показали тенденцию к намыву. На остальных восьми постах (20 % случаев) тенденция не выражена (см. таблицу).

Независимо от направленности деформаций, на всех гидрометрических створах выделяются отдельные циклы размыва или намыва (рис. 4–6). Характерная длительность полуциклов, в тече-

ние которых происходят наибольшие изменения глубины русла за отдельный цикл, составляет 3–10 лет (76 % случаев). При тенденции размыва эти наибольшие изменения в цикле отрицательные, при тенденции к намыву — положительные. При отсутствии тенденции их знак может быть различным (см. таблицу).

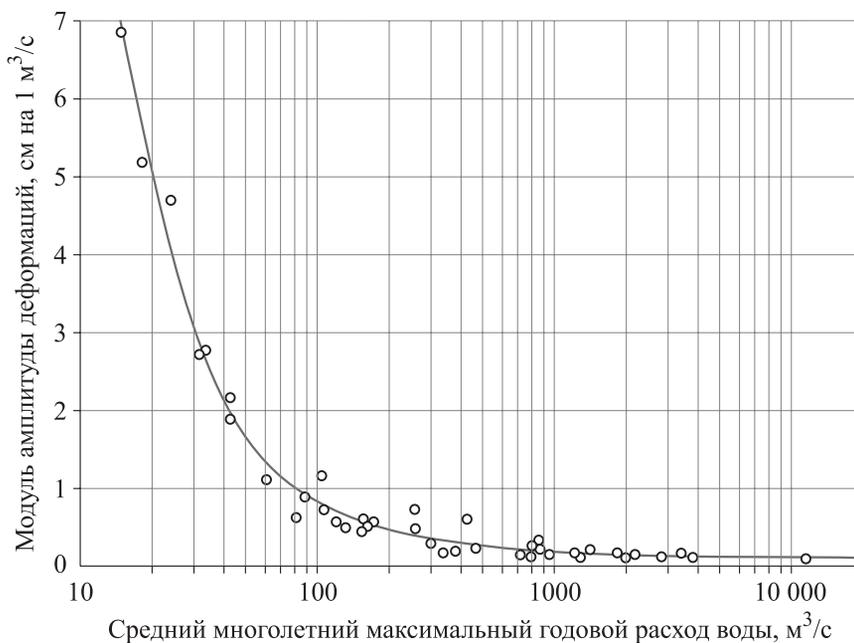


Рис. 3. Связь между модулем амплитуды вертикальных деформаций и средним многолетним максимальным годовым расходом воды.

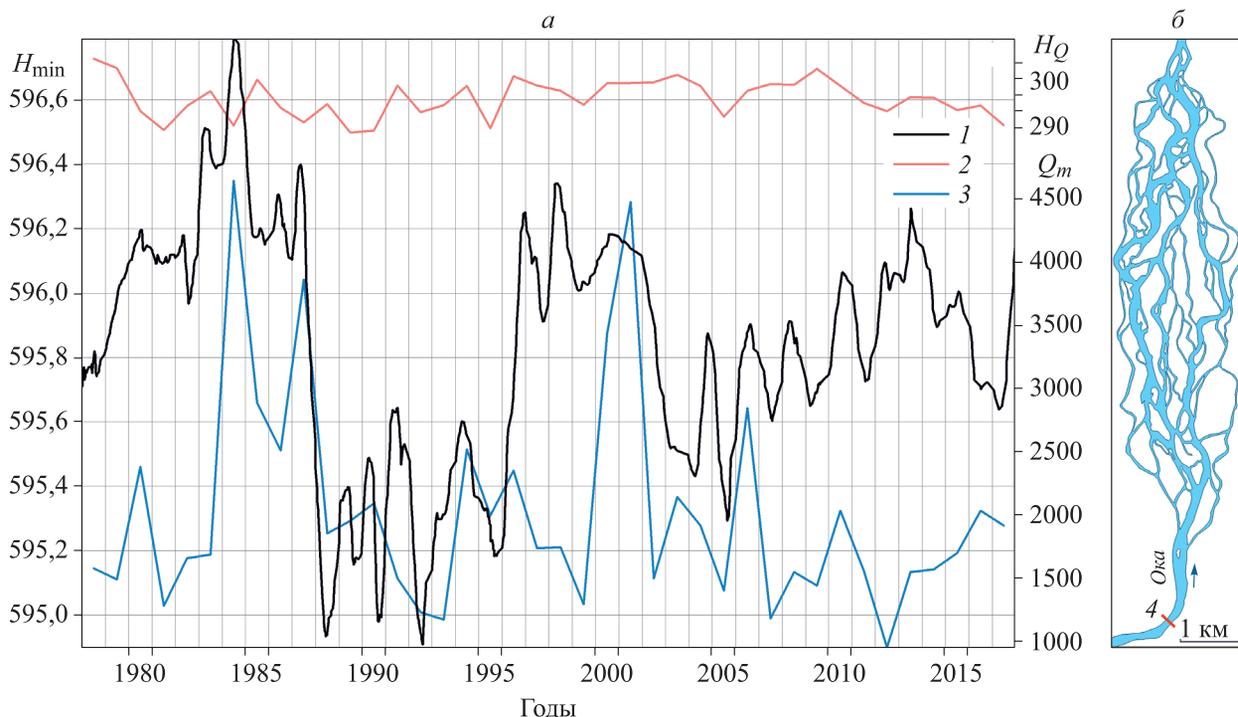


Рис. 4. Изменение некоторых характеристик вертикальных деформаций русла р. Оки у пос. Сарам в течение периода наблюдений.

*a* — хронологические графики; *б* — схема русла р. Оки ниже гидрометрического створа. 1 — низшие отметки русла  $H_{\min}$ , м; 2 — деформации, рассчитанные по кривым  $Q = f(H)$ ,  $H_Q$ , см; 3 — максимальные годовые расходы воды  $Q_m$ ,  $m^3/s$ ; 4 — створ поста.

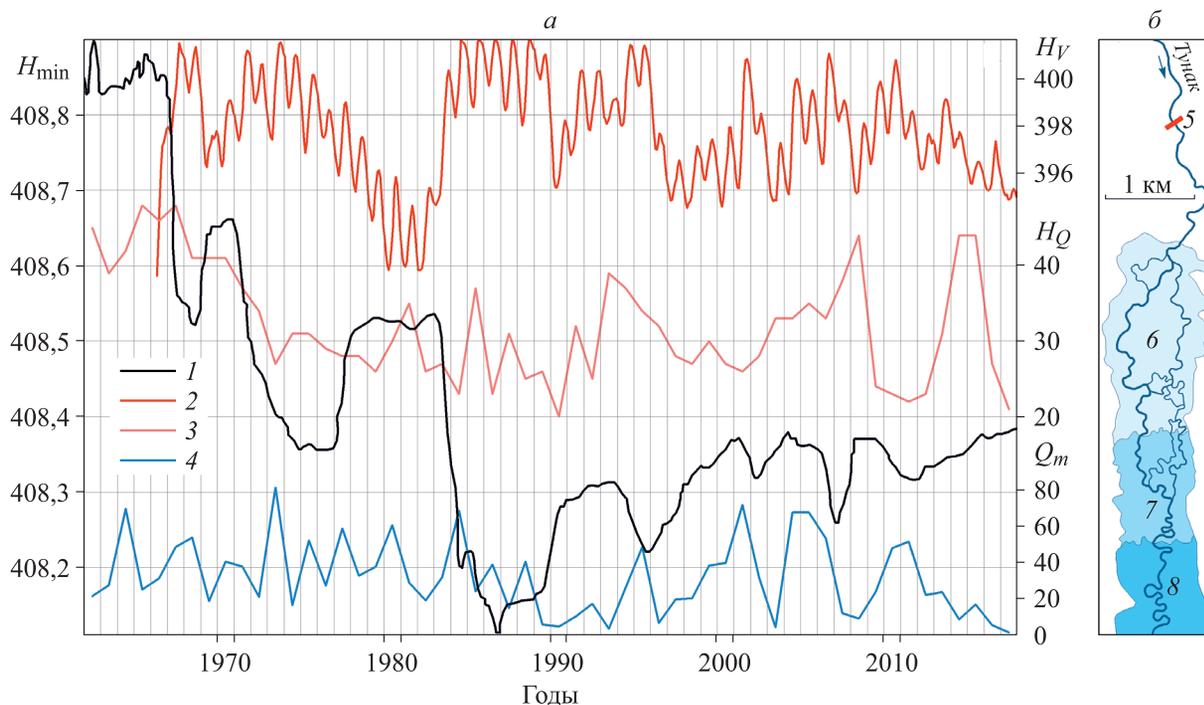


Рис. 5. Изменение некоторых характеристик вертикальных деформаций русла р. Тунак у д. Чичкова в течение периода наблюдений.

*a* — хронологические графики; *б* — схема русла р. Тунак ниже гидрометрического створа в зоне выклинивания подпора водохранилища. 1 — низшие отметки русла  $H_{\min}$ , м; 2 — уровень Братского водохранилища  $H_V$ , м; 3 — деформации, рассчитанные по кривым  $Q = f(H)$ ,  $H_Q$ , см; 4 — максимальные годовые расходы воды  $Q_m$ , м<sup>3</sup>/с; 5 — створ поста; 6, 7 — зоны переменного подпора (см. пояснения в тексте); 8 — зона постоянного наполнения.

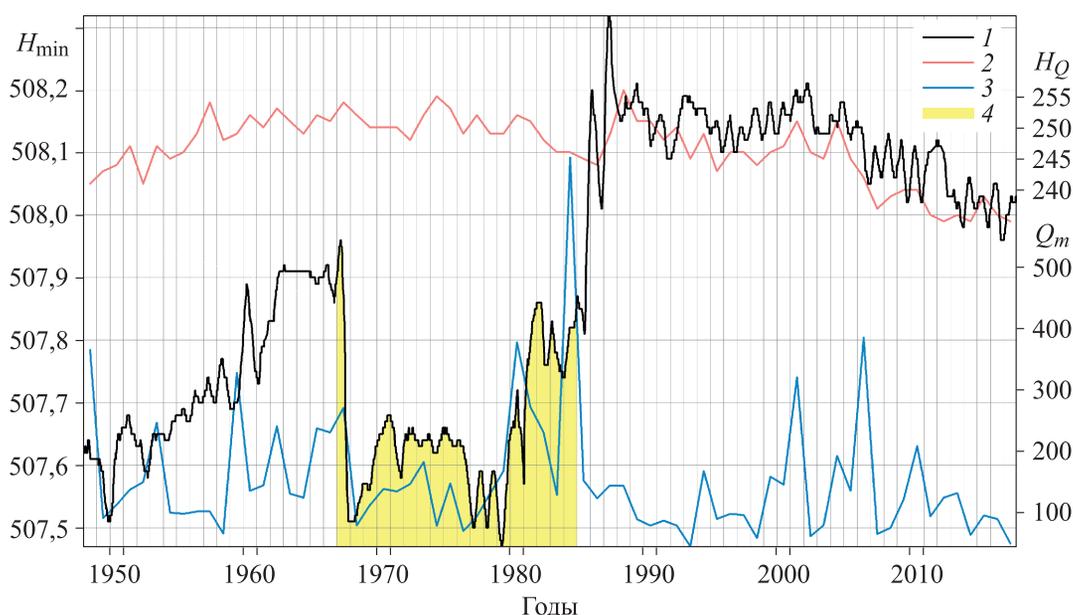


Рис. 6. Изменение некоторых характеристик вертикальных деформаций русла р. Зимы у пос. Зулумай в течение периода наблюдений.

1 — низшие отметки русла  $H_{\min}$ , м; 2 — деформации, рассчитанные по кривым  $Q = f(H)$ ,  $H_Q$ , см; 3 — максимальные годовые расходы воды  $Q_m$ , м<sup>3</sup>/с; 4 — период молевого лесосплава.

Как и в случае с амплитудой деформаций, для деформаций в цикле наблюдается обратная связь их относительных значений с размерами реки. Однако, в отличие от амплитуды, отмечается более тесная прямая связь абсолютных значений деформаций в цикле с площадью водосбора (коэффициент корреляции 0,87 для тенденции к размыву и 0,71 — для тенденции к намыву).

При сравнении результатов расчетов вертикальных деформаций по низшим отметкам русла и по кривым  $Q = f(H)$  видно, что деформации, рассчитанные по кривым, всегда меньше в 2–10 раз и более. Однако более важным является то, что тенденции деформаций, определенные по результатам расчета обоими способами, в 66 % случаев не совпадают. Это заставляет относиться с большой осторожностью к расчетам вертикальных деформаций по кривым  $Q = f(H)$ .

**Примеры интерпретации результатов расчета вертикальных деформаций по низшим отметкам русла.**  
*Гидрометрический створ на р. Оке у пос. Сарам* расположен на выходе реки из предгорий Восточного Саяна на Предсаянский краевой прогиб. В 1,5 км ниже створа река образует внутреннюю дельту с сильно развитой пойменной многоорукавностью (см. рис. 4, б). Уклоны реки на этом участке резко уменьшаются от 4–5 ‰ выше поста до 0,1–0,3 ‰ на участке внутренней дельты. При прохождении выдающихся паводков многоорукавное русло спрямляется, многие протоки перестают функционировать и уклоны в целом на участке увеличиваются. Это способствует выносу материала в дельту. На посту начинается интенсивный размыв, который может достигать в среднем 25 см в год. При последующем маловодном периоде режим многоорукавности постепенно восстанавливается, уклоны уменьшаются, в гидрометрическом створе создается подпор и начинается отложение материала. Этот цикл продолжается до следующего выдающегося паводка.

На графиках видно, что паводок 1,5%-й обеспеченности в 1984 г. привел к понижению отметок дна на 60 см, а последовавший через три года паводок 4%-й обеспеченности размыв еще более метра ложа русла (см. рис. 4, а). Режим начал восстанавливаться в 1991 г., а в 2001 г. очередной паводок 2%-й обеспеченности опять привел к понижению отметок дна примерно на 80 см. Деформации, рассчитанные по кривым  $Q = f(H)$ , никак не отразили эти процессы. Их амплитуда составила всего 22 см, в то время как после паводков 1984, 1987 гг. русло понизилось на 186 см.

*Гидрометрический створ на р. Тунак у д. Чичкова* расположен на Лено-Ангарском плато и после создания Братского водохранилища удален на 1,3 км от его уреза при нормальном подпорном горизонте (НПГ). На участке реки до уреза преобладает ленточно-грядовый тип руслового процесса. Ниже, в зонах 6 и 7 (см. рис. 5, б), — пойменная многоорукавность с фрагментами незавершенного меандрирования. Уклон на верхнем участке — 0,6–1,0 ‰, в зонах 6 и 7 — 0,1–0,3 ‰.

После заполнения водохранилища до НПГ в 1967 г. начался интенсивный размыв русла, и отметки дна за первые два года опустились более чем на 30 см (см. рис. 5, а). До затопления небольшой уклон зоны 6 не способствовал свободному транспорту наносов. После затопления водная масса водохранилища оказалась способной вместить любой объем перемещаемых наносов с вышележащих участков, что привело к размыву русла на посту.

Из данных рис. 5, а следует, что отметки русла тесно связаны с уровнем водохранилища. Когда его уровень находится в зоне 6, происходит размыв русла. При снижении уровня до зоны 7 начинается аккумуляция наносов на посту. Водность реки при этом на деформациях русла не сказывается.

Деформации, рассчитанные по кривым  $Q = f(H)$ , плохо согласуются с результатами расчетов по низшим отметкам русла. Их амплитуда почти в три раза меньше, а направленность деформаций совпадает лишь в начальный период заполнения водохранилища.

*Гидрометрический створ на р. Зиме у пос. Зулумай* расположен в пределах Иркутско-Черемховской равнины. Здесь отмечалась устойчивая тенденция к аккумуляции отложений (см. рис. 6). Она была прервана в 1967 г., когда на реке начался интенсивный молевой лесосплав. Отметки дна русла за счет выноса твердого материала со сплавным лесом снизились более чем на 40 см. В начале 1980-х гг. интенсивность лесосплава из-за выработки лесопромышленной базы снизилась и отметки русла стали восстанавливаться. В 1984 г. прошел паводок 1%-й обеспеченности. Лесосплавные сооружения были разрушены, лесосплав прекратился, а в 1987 г. был запрещен постановлением правительства РСФСР [20]. Расчеты по кривым  $Q = f(H)$  не показали снижения отметок русла в период лесосплава (см. рис. 6).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод расчета вертикальных русловых деформаций по низшим отметкам русла показал его эффективность и непротиворечивость результатов при проведении исследований на реках разных размеров и в различных физико-географических условиях. Исходной информацией для этого

являются доступные материалы измерений на сети гидрологических постов Росгидромета, что позволяет при наличии соответствующего программного обеспечения выполнять массовые исследования. Приведенные в работе примеры показывают способность описанного подхода выявлять различные особенности процесса вертикальных деформаций русел рек. В частности, на его основе сделан вывод о связи между деформациями и расходами воды, когда один и тот же расход воды на малых реках может производить в десятки раз большую работу деформации ложа русла, чем на крупных реках.

Использование метода расчета русловых деформаций, основанного на кривых  $Q = f(H)$ , вызывает ряд затруднений. Главным из них является наличие многих иных факторов, кроме размыва или намыва русла в створе измерений, влияющих на положение кривой  $Q = f(H)$ . Это делает результаты расчета неоднозначными и во многом противоречивыми. Для такого подхода требуется обоснование его применимости в каждом конкретном случае с учетом гидравлико-морфометрических особенностей участка гидрометрического створа от переката до переката, что затруднено из-за отсутствия массовых исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. — Л.: Гидрометеоздат, 1982. — 272 с.
2. Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. — 232 с.
3. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. — СПб.: Нестор-История, 2011. — 504 с.
4. Karegar M.A., Dixon T.H., Kusche J., Chambers D.P. A new hybrid method for estimating hydrologically induced vertical deformation from GRACE and a hydrological model: An example from Central North America // Journ. of Advances in Modeling Earth Systems. — 2018. — Vol. 10, Issue 5. — P. 1196–1217.
5. Алексеевский Н.И., Самохин М.А. Пространственно-временная изменчивость уровней воды в руслах рек // Уч. зап. Рос. гидромет. ун-та. — 2007. — № 5. — С. 21–28.
6. Алексеевский Н.И., Беркович К.М., Чалов Р.С., Чалов С.Р. Пространственно-временная изменчивость русловых деформаций на реках России // География и природ. ресурсы. — 2012. — № 3. — С. 13–21.
7. Двинских С.А., Девяткова Т.П., Китаев А.Б., Тереханова Т.А. Динамика кривых расходов воды как индикатор русловых процессов // Геогр. вестн. — 2012. — Т. 4 (23). — С. 30–40.
8. Колтунова М.А. Кривые расходов воды в анализе вертикальных русловых деформаций // Эколого-географические исследования в речных бассейнах: Материалы IV Всерос. науч.-практ. конференции. — Воронеж: Изд-во Воронеж. пед. ун-та, 2014. — С. 42–45.
9. Беркович К.М., Злотина Л.В., Турькин Л.А. Естественные и антропогенные направленные вертикальные деформации русел рек // Геоморфология. — 2017. — № 4. — С. 3–15.
10. Меркулова М.А., Павлюк Я.В. Изучение вертикальных русловых деформаций в пределах юга европейского центра России // Науч. ведомости Белгород. ун-та. Сер. Естеств. науки. — 2018. — Т. 42, № 2. — С. 203–213.
11. Карасев И.Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — 310 с.
12. Железняков Г.В. Пропускная способность русел рек и каналов. — Л.: Гидрометеоздат, 1979. — 254 с.
13. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6, ч. 3. Составление и подготовка к печати гидрологических ежегодников / Под ред. В.В. Уханова, А.К. Проскуракова. — Л.: Гидрометеоздат, 1958. — 291 с.
14. Глушков В.Г. Вопросы теории и методы гидрологических исследований. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — 320 с.
15. Кравченко В.В. Натурные исследования процесса образования речных наледей // Гляциологические исследования в Сибири. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 1985. — С. 38–63.
16. Виноградов В.А., Клавен А.Б. О скоплении наносов в русле р. Поломети и их влиянии на элементы гидрологического режима // Труды Гос. гидрол. ин-та. — 2002. — Вып. 361. — С. 21–25.
17. Slater L., Singer M.V. Imprint of climate and climate change in alluvial riverbeds: Continental United States, 1950–2011 // Geology. — 2013. — Vol 41 (5). — P. 595–598.
18. Караушев А.В. Речная гидравлика. — Л.: Гидрометеоздат, 1969. — 418 с.
19. Железняков Г.В. Теория гидрометрии. — Л.: Гидрометеоздат, 1976. — 343 с.
20. Постановление Совета Министров РСФСР от 25 сентября 1987 года № 384 «О прекращении молевого сплава леса на реках и других водоемах РСФСР» [Электронный ресурс]. — <https://docs.cntd.ru/document/765725002> (дата обращения 10.09.2021).

*Поступила в редакцию 21.10.2021*

*После доработки 07.02.2022*

*Принята к публикации 05.07.2022*