

## Физико-географические исследования

УДК 556.53

*А.Р. Амирова, Г.И. Калимуллина, В.В. Мозжерин, В.В. Хуснутдинова*

### РАЗРАБОТКА ГИДРОЛОГО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВЛЕНИЯ ГРАНИЦ ВОДОТОКОВ И ЕЕ ВЕРИФИКАЦИЯ (НА ПРИМЕРЕ РЕК БАССЕЙНА Р. ВЯТКИ)

Предложена и апробирована новая методика установления береговых линий (границ) водотоков в соответствии с требованиями современного российского водного законодательства. Согласно Водному кодексу Российской Федерации границей рек и ручьев служит береговая линия при среднем многолетнем уровне воды за период, когда водный объект не покрыт льдом. Этот уровень заранее неизвестен: он не может быть непосредственно измерен на местности, в гидрологических справочниках он не приводится, так как не считается характерным, а на картографических материалах очертания водных объектов даются при среднем уровне воды за летне-осеннюю межень. Для определения искомого уровня авторами на примере рек бассейна р. Вятки предложена принципиально новая методика, в основе которой лежит гидролого-статистическая модель: прогнозируемым параметром выступает величина  $\Delta H$  (превышение среднего многолетнего уровня воды за безледный период над средним уровнем летне-осенней межени), а предикторами (факторами) модели – условия формирования и прохождения стока. Перечисленные факторы связаны с величиной  $\Delta H$  степенной зависимостью, коэффициенты которой установлены методом наименьших квадратов по материалам наблюдений на 17 гидрологических постах. Средняя ошибка расчета величины  $\Delta H$  составила  $5,4 \pm 2,2$  см (уровень значимости 0,05). Практическая ценность уравнения заключается в том, что для произвольной точки или отрезка водотока можно вычислить требуемый уровень, а в дальнейшем по крупномасштабным картам установить границу водного объекта, даже при условии отсутствия на нем гидрометрических наблюдений. Картирование береговой линии р. Вятки в черте г. Кирова и сравнение ее положения с береговой линией на детальном космическом снимке, полученном на дату с уровнем, близким к расчетному, показывают, что средняя квадратическая погрешность определения планового положения берега не превышает 1,3 м, что полностью соответствует требованиям к точности передачи границ земель водного фонда.

*Ключевые слова:* Водный кодекс, водотоки, земли водного фонда, граница водного объекта, период открытого русла, бассейн р. Вятки, гидрометрические наблюдения, космические снимки, Landsat 8.

DOI: 10.35634/2412-9518-2019-29-2-231-242

Одной из практически важных задач учета, охраны и использования водных ресурсов является определение береговых линий (границ) водных объектов в соответствии с требованиями современного российского водного законодательства. По этим требованиям границей всех водных объектов суши естественного (рек, ручьев, озер) и некоторых водных объектов искусственного (каналы, обводненные карьеры) происхождения считается береговая линия при среднем многолетнем уровне воды за период, когда водный объект не покрыт льдом.<sup>1</sup> Нормативно-правовой основой установления границ водных объектов служит Постановление Правительства Российской Федерации от 29 апреля 2016 г. №377 «Об утверждении правил определения местоположения береговой линии...».<sup>2</sup> К перечню задач, решение которых требует определения местоположения границ водных объектов, можно отнести различные формы использования водных ресурсов, установление границ водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы, инвентаризацию водных объектов (включая ведение Государственного водного кадастра), постановку земель водного фонда на учет в Единый государственный кадастр недвижимости, градостроительство и планирование территорий, реализацию различных природоохранных мероприятий, оценку ресурсного потенциала территорий, разрешение имущественных споров, изменение местоположения водного объекта в результате процессов природного (в том числе стихийного) или антропогенного характера.

<sup>1</sup> Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 №74-ФЗ (действующая ред. от 27.12.2018), 2006.

<sup>2</sup> Постановление Правительства РФ от 29 апреля 2016 г. №377 «Об утверждении Правил определения местоположения береговой линии (границы водного объекта), случаев и периодичности ее определения и о внесении изменений в Правила установления на местности границ водоохранных зон и границ прибрежных защитных полос водных объектов» (с доп. и изм. от 14 декабря 2018 г.).

Основную сложность представляет определение границ водных объектов суши по среднему многолетнему уровню воды за период, когда водный объект не покрыт льдом (так называемый «безледный период» или «период открытого русла»). Это объясняется тем, что искомый уровень, с одной стороны, является расчетной характеристикой и не может быть непосредственно измерен на местности. С другой стороны, в практике гидрологических расчетов среднеемноголетний уровень воды за период, когда водные объекты не покрыты льдом, не определяется, так как не считается характерным. Соответственно, и в нормативных документах,<sup>3</sup> и в руководствах, регламентирующих расчеты основных гидрологических характеристик [1; 2], отсутствуют методы его вычисления. На топографических картах и планах очертания водных объектов зафиксированы либо при среднем межennem уресе водной поверхности, либо при зафиксированном на дату съемки уровне [3; 4].

В самом Водном кодексе порядок определения границ водных объектов не регламентируется. В Постановлении Правительства от 29.04.2016 № 377 процедура определения границ водных объектов проводится в два этапа: путем установления или путем уточнения. В первом случае речь идет о водных объектах, для которых границы ранее не определялись; сами границы могут быть определены картометрическим способом (иными словами, проведенная на топографических картах береговая линия принимается за границу водного объекта). Во втором случае установленные таким образом границы водных объектов могут быть уточнены на основе вычисления среднего многолетнего уровня воды за безледный период, но опять же без указания конкретных механизмов уточнения. Наиболее полные методические рекомендации по этой проблеме содержатся в изданиях Государственного гидрологического института (ГГИ) 2005 и 2009 гг. [5; 6], однако и они не могут считаться универсальными. Так, для гидрологически изученных участков водотоков (то есть на участках, в пределах которых ведутся долгосрочные режимные наблюдения) искомый уровень может быть определен из материалов наблюдений и перенесен на соседние участки (вверх и вниз по течению) при условии постоянства гидроморфологических и гидродинамических условий. На неизученных участках по результатам гидрологических и геодезических изысканий устанавливается кривая связи расхода  $Q$  от уровня воды  $H$ , по которой при вычисленной по рекам-аналогам величине расхода воды за безледный период определяется соответствующий ему уровень. Полученная таким образом отметка также может быть экстраполирована на выше- и нижележащие участки водотоков. Сведения об определении искомого уровня водоемов (озер и обводненных карьеров) в упомянутых рекомендациях ГГИ отсутствуют. Наконец, перспективным представляется подход к определению среднего многолетнего уровня по разновременным космическим снимкам за многолетний период; в настоящее время такой подход в основном используется при изучении зон затопления [7], но может быть с успехом реализован для решения задач по установлению границ водных объектов. Однако для своей реализации метод требует наличия длинного (не менее 20–25-летнего) ряда снимков высокого пространственного разрешения, хронологически отнесенных к периоду, когда водные объекты не покрыты льдом.

Цель предлагаемого исследования заключается в разработке универсальной гидролого-статистической модели, позволяющей прогнозировать средний многолетний уровень воды за безледный период водотоков или их участков, неизученных в гидрологическом отношении, и верификация полученной модели по материалам высокоточных и детальных космических съемок.

### Материал и методы исследования

Гидролого-статистическая модель задается в виде прогностического уравнения; расчетным (прогнозируемым) признаком является величина  $\Delta H$ , которая характеризует превышение искомого среднего многолетнего уровня за безледный период  $H_{б/л}$  над средним многолетним уровнем летне-осенней межени  $H_m$ , при котором на топографических картах и планах зафиксированы очертания водных объектов [3; 4]:

$$\Delta H = H_{б/л} - H_m. \quad (1)$$

Исходя из гидрологической сущности явления, величина  $\Delta H$ , осредненная за многолетний период, является всегда величиной положительной, поскольку период свободного ото льда русла включает в себя, помимо летне-осенней межени, такие многоводные фазы водного режима, как половодье

<sup>3</sup> СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госком РФ по строительству и жил.-комму. комплексу, 2004.

и паводки. Лишь в отдельные годы на фоне низкого половодья и высокой межени, а также на некоторых малых водотоках значения  $\Delta H$  могут быть нулевыми или даже отрицательными, но близкими к нулю. В последующем при известных величинах  $\Delta H$  и  $H_m$  (последние берутся с топографических карт крупного масштаба) могут быть рассчитаны  $H_{6/л}$ , по которым осуществляется картирование границ водного объекта по горизонталям и высотным отметкам береговой зоны.

На начальном этапе проводится нахождение прогнозируемого превышения  $\Delta H$  путем статистической обработки данных ежесуточных измерений уровней воды на гидрологических постах. Материалы ежесуточных измерений для расчета моделируемого признака за весь период наблюдений содержатся в «Гидрологических ежегодниках», издаваемых под редакцией Гидрометеорологической службы СССР (в настоящее время – Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды). Альтернативным источником общедоступных данных об уровнемерных наблюдениях может служить интернет-портал Центра регистра и кадастра гидротехнических сооружений [8], на котором накапливается информация об уровнях и расходах воды, ледовых явлениях, температуре воды и воздуха, а также других показателях, начиная с 2001 г.

Нахождение среднего уровня воды за безледный период конкретного года проводится путем вычленения из ряда ежесуточных уровней той части, что соответствует дням с открытой водной поверхностью (дням без ледовых явлений на водном объекте) с последующим нахождением средней величины в усеченном ряду. Средний многолетний уровень воды за рассматриваемый период  $H_{6/л}$  на гидрологическом посту находится как средняя величина из средних уровней воды за отдельные годы. Средний уровень воды за летне-осеннюю межень может быть получен графоаналитически, путем срезки половодных и паводочных уровней на графиках внутригодового хода уровней с последующим расчетом общей средней за многолетний период. Для получения статистически надежной средней величины необходимо, чтобы продолжительность наблюдений на посту составляла не менее 30 лет (оптимально 50–60 лет) [1; 9].

Предварительные исследования показывают, что превышения средних многолетних уровней воды за период открытого русла  $H_{6/л}$  над средним уровнем летне-осенней межени  $H_m$  определяются влиянием двух в значительной степени независимых друг от друга групп факторов: а) величины расхода воды  $Q$  и факторов формирования водного стока (длины  $L$  и площади  $A$  водосбора, средней высоты  $H$  и среднего уклона  $I_c$  его поверхности, озерности  $A_o$ , залесенности  $A_l$ , заболоченности  $A_b$  и закарстованности  $A_k$  речного бассейна и др.); б) факторов прохождения стока на отдельных участках русла (таких, как уклон водной поверхности  $I$ , ширина  $B$  и глубина  $h$  русла, гидравлический радиус  $R$ , смоченный периметр  $P$  и площадь живого сечения  $F$ , коэффициент шероховатости грунтов  $n$ , средняя скорость потока  $v$  и средняя высота береговых уступов  $h_6$  и др.):

$$\Delta H = f([Q, L, A, H, I_c, A_o, A_l, A_b, A_k \dots], [I, B, h, R, P, F, n, v, h_6 \dots]) \quad (2)$$

Числовые значения некоторых перечисленных показателей могут быть заимствованы из гидрологических справочников, либо вычислены по топографическим картам, цифровым моделям местности, цифровым моделям рельефа или детальным данным дистанционного зондирования. В зависимости от полноты исходной картографической или аэрокосмической информации набор предикторов (факторов) может быть расширен или сокращен.

На следующем этапе проводится корреляционный анализ между значениями отдельных факторов и изучаемым признаком с выявлением тех показателей, которые наилучшим образом связаны с величиной  $\Delta H$ , а также корреляционный анализ между отдельными факторами с целью устранения взаимокоррелированных предикторов. На завершающем этапе средствами регрессионного анализа на основе отобранных факторов конструируется уравнение, рассчитываются его коэффициенты и проводится оценка точности полученных результатов.

Построение гидролого-статистической модели рекомендуется проводить для ограниченных территорий, внутри которых существуют однородные географические условия формирования и прохождения стока. Такими территориями могут, например, служить несколько соседних водохозяйственных участков внутри одного речного подбассейна по схеме гидрографического и водохозяйственного районирования Российской Федерации или физико-географические провинции в сетке ландшафтного районирования.

В предлагаемом исследовании построение гидролого-статистической модели производилось для бассейна р. Вятки. К исследованию были привлечены 17 постов, расположенных непосредственно на главной реке или на ее притоках разного порядка. Основные сведения о постах приведены в

табл. 1. На выбор постов накладывалось два ограничения. Первое: доступная для обработки продолжительность наблюдений  $N$  за уровнями воды, ледовой обстановкой и расходами воды должна составлять не менее 45–50 лет для обеспечения статистической надежности получаемых результатов. Второе: для всех постов должен быть известен одинаковый, максимально широкий набор гидрографических характеристик.

Таблица 1

**Основные сведения о речных гидрологических постах в бассейне р. Вятки, привлеченных к исследованию**

Река – пост	$N$ , лет	Средний уровень, см над «0» графика		$\Delta H$ , см	$A$ , км <sup>2</sup>	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$I$ , ‰
		$H_{0/l}$	$H_m$				
Вятка – с. Красноглинье	48	125	117	8	2 320	22,7	0,10
Вятка – д. Усатьевская	57	268	228	41	16 500	142	0,04
Вятка – г. Киров	63	30	-23	53	48 300	373	0,09
Вятка – г. Котельнич	64	122	59	64	72 000	567	0,14
Вятка – пгт. Аркуль	57	187	116	71	96 900	671	0,06
Вятка – г. Вятские Поляны	63	207	118	89	124 000	851	0,09
Летка – с. Казань	50	230	200	29	2 870	22,3	0,16
Чепца – с. Полом	51	212	194	18	5 930	35,3	0,13
Чепца – г. Глазов	62	71	56	15	9 750	62,3	0,17
Чепца – д. Целоусы	48	185	153	31	18 900	122	0,10
Быстрица – д. Шипицино	51	143	135	8	3 540	22,1	0,23
Молома – д. Пермьская	64	116	82	34	6 070	47,4	0,25
Молома – д. Спасское	63	197	170	27	10 600	80,0	0,16
Кильмезь – д. Вичмарь	53	356	329	27	16 400	84,6	0,14
Лумпун – д. Шмыки	51	601	592	9	1 210	7,47	0,36
Вала – с. Вавож	51	75	48	26	4 770	20,0	0,30
Лобань – с. Рыбная Ватага	51	284	269	15	2 300	14,0	0,15

*Примечание.* Расшифровка латинских обозначений в шапке таблицы дана по тексту. В таблицу включены только те факторы, которые были использованы при построении модели.

### Результаты и их обсуждение

Корреляционный анализ показал, что между величиной  $\Delta H$  и отдельными контролирующими ее факторами устанавливаются очень неравноценные статистические связи (табл. 2). Наилучшим образом величина  $\Delta H$  связана с крупностью водотока, оцениваемой через длину  $L$ , площадь водосбора  $A$ , среднегодовой расход воды  $Q^4$  и ширину речного русла  $B$ . Также хорошая корреляционная зависимость обнаружена между озерностью  $A_o$ , глубиной русла  $h$ , уклоном водной поверхности  $I$  и заболоченностью  $A_b$ . Статистически надежные корреляционные зависимости не обнаружены для факторов рельефа (средней высоты  $H$  и уклона  $I_c$  поверхности водосбора) и залесенности  $A_l$ . Это обстоятельство связано с крайне низкой изменчивостью последних трех факторов (коэффициент вариации  $C_v$  для них не превышает 0,25) – все анализируемые бассейны заложены в однородных орографических условиях и отличаются высокой степенью развития лесов.

Гидролого-статистическая модель, задаваемая в виде прогностического уравнения, сконструирована с учетом 4 факторов, для которых коэффициент корреляции больше или равен 0,75, а коэффициент вариации не меньше 0,25: площади водосбора  $A$ , произведения  $QI$ , озерности  $A_o$  и площади живого сечения  $F$ , которое может быть вычислено как произведение ширины потока  $B$  на его среднюю глубину  $h$ :

<sup>4</sup> Методически более верным было бы использование величины расхода за безледный период; однако, во-первых, ее получение сопряжено с необходимостью проведения дополнительных изысканий, а, во-вторых, между средними расходами воды за год и за период открытого русла устанавливается очень тесная, почти функциональная связь.

$$\Delta H = H_{\delta/l} - H_m = k_1 A^\alpha (QI)^\beta A_o^\gamma F^\delta + k_2, \quad (3)$$

где  $k_1, k_2, \alpha \dots \delta$  – коэффициенты уравнения, устанавливаемые эмпирически. Выбор степенного уравнения обусловлен с одной стороны его высокой универсальностью, а с другой стороны – тем, что большинство гидрологических связей подчиняются степенным зависимостям. Длина водотока  $L$  из последующих расчетов исключена, поскольку она скоррелирована с площадью водосбора  $A$ . Коэффициент  $QI$  широко используется в практике гидрологических исследований для характеристики формы речного русла и оценки его емкости (пропускной способности) [10]. Решение по методу наименьших квадратов позволило получить следующее уравнение:

$$\Delta H = 4,6641 \left( \frac{A}{1000} \right)^{0,5642} (QI)^{0,0224} + 7,6618. \quad (4)$$

Показатели степени при переменных  $A_o$  и  $F$  оказались меньше 0,001, так что вклад этих факторов в величину  $\Delta H$  исчезающе мал. Размерность переменных в уравнении [4] та же, что в табл. 1.

Таблица 2

### Результаты корреляционного анализа между величиной $\Delta H$ и контролирующими ее факторами

Фактор	Коэффициент корреляции	Характеристика корреляционной связи			Коэффициент вариации фактора $C_v$
		Теснота	Характер	Направление	
$L$	$r = 0,963$	тесная	близка к линейной	прямое	0,964
$A$	$r = 0,934$	тесная	близка к линейной	прямое	1,582
$Q$	$r = 0,948$	тесная	близка к линейной	прямое	1,602
$H$	$r = 0,192$	отсутствует			0,139
$I_c$	$r = -0,253$	слабая	близка к линейной	обратное	0,138
$A_o$	$r = 0,771$	тесная	близка к линейной	прямая	1,329
$A_n$	$\eta = 0,241$	отсутствует			0,243
$A_\delta$	$\eta = 0,506$	средняя	криволинейная	прямое	0,866
$I$	$\eta = 0,521$	средняя	криволинейная	обратное	0,471
$B$	$r = 0,914$	тесная	близка к линейной	прямое	1,040
$h$	$r = 0,728$	средняя	близка к линейной	прямое	0,491
$F$	$r = 0,870$	тесная	близка к линейной	прямое	1,420
$QI$	$r = 0,881$	тесная	близка к линейной	прямое	1,433

*Примечание.* Расшифровка латинских обозначений в графе «Факторы» дана по тексту.  $r$  – коэффициент прямолинейной корреляции,  $\eta$  – корреляционное отношение (коэффициент криволинейной корреляции).

Между фактическими и прогнозируемыми величинами превышения среднего многолетнего уровня воды за безледный период  $H_{\delta/l}$  над средним уровнем летне-осенней межени  $H_m$  ( $\Delta H$ ) наблюдается тесная связь с коэффициентом детерминации  $R^2$ , равным 0,911 (рис. 1). Средняя ошибка прогноза за величины  $\Delta H$  составляет 5,4 см с доверительным интервалом  $\pm 2,2$  см на 95 %-ом пороге вероятности безошибочного прогноза (уровень значимости нулевой гипотезы  $\alpha$  равен 0,05). Наименьшие отклонения (без учета знака) фактических значений  $\Delta H$  от расчетных (прогнозируемых) не превышают 1 см; при этом наибольшие отклонения достигают 10–13 см (посты Летка – с. Казань и Молома – д. Пермская), что составляет менее 10 % от годовой амплитуды колебаний уровней воды на гидрологических постах (табл. 3). Величина ошибки несколько снижается с возрастанием величины  $\Delta H$  (рис. 1), но при этом она не обнаруживает статистически значимой связи с факторами, привлеченными к исследованию; можно полагать, что она отражает вклад иных, неучтенных причин.

Ошибки прогнозирования  $\Delta H$  неизбежно ведут к погрешностям в расчете среднего многолетнего уровня воды за безледный период  $H_{\delta/l}$  на ту же величину, а, следовательно, к ошибкам определения планового положения границы водного объекта. Ошибки планового положения применительно к береговой линии в свою очередь целиком определяются крутизной рельефа береговой зоны: бóльшим значениям крутизны соответствуют меньшие по величине плановые смещения. Так, средняя ошибка вычисления  $H_{\delta/l}$ , равная 5,4 см, при крутизне берегов менее  $1^\circ$  способна привести к смещению береговой линии в плане относительно ее истинного местоположения на 3,1 м и более; при крутизне от 3

до  $5^\circ$  эти смещения снижаются до 0,6–1,0 м, а при крутизне  $10^\circ$  и более становятся равными 0,3 м и менее. Согласно существующим требованиям средняя квадратическая погрешность установления границ земель водного фонда не должна превышать 5,0 м.<sup>5</sup> Полученные результаты свидетельствуют, что даже наибольшие теоретически возможные смещения береговой линии, связанные с применением полученного уравнения, не выходят за пределы установленных требований.

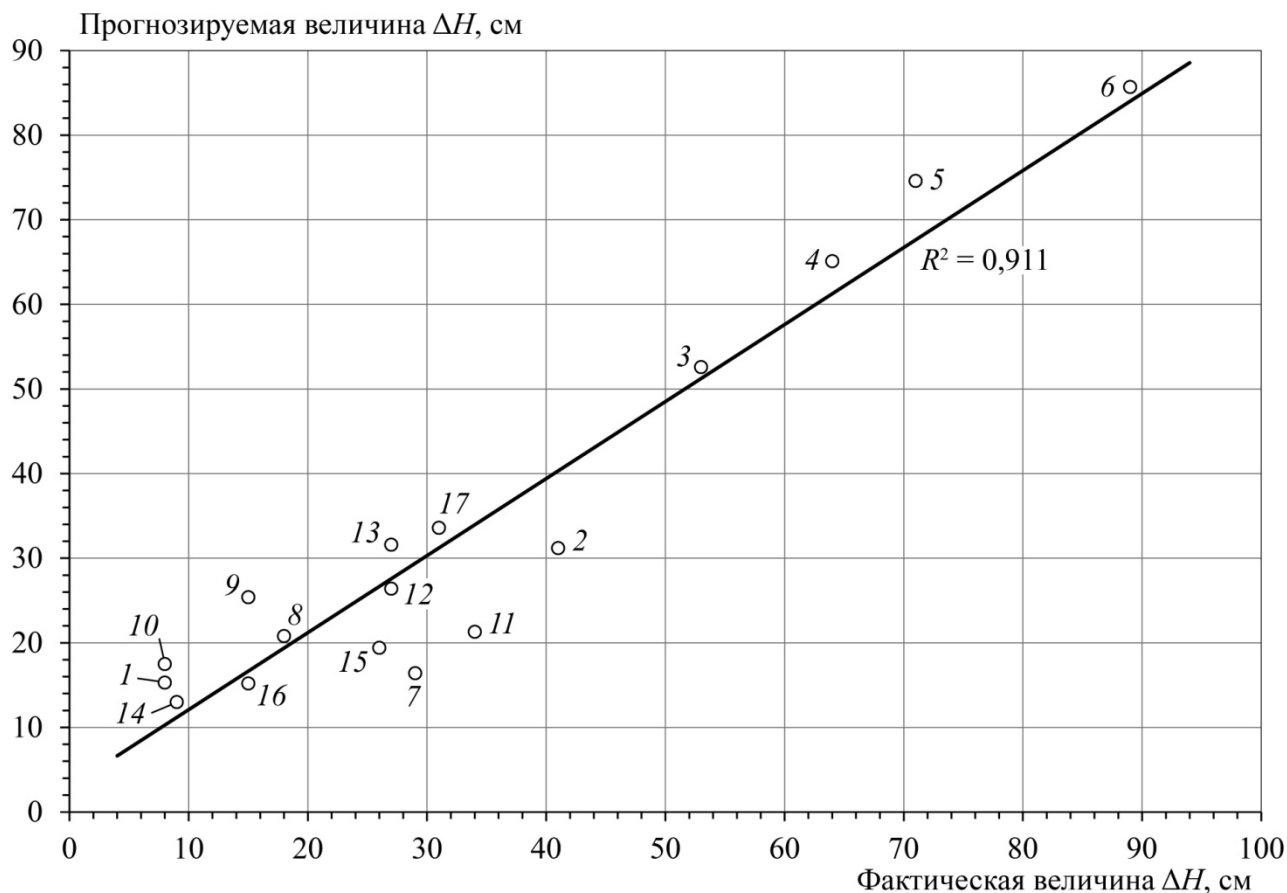


Рис. 1. Зависимость между фактическими и прогнозируемыми величинами превышения среднего многолетнего уровня воды за безледный период над средним уровнем летне-осенней межени. Условные обозначения:  $R^2$  – коэффициент достоверности аппроксимации. Цифры у точек соответствуют номерам гидрологических постов по табл. 1

На завершающем этапе была проведена оценка точности построения границ водного объекта по среднему многолетнему уровню воды за безледный период  $H_{б/л}$ , полученному с использованием гидролого-статистической модели. С этой целью для р. Вятки в черте г. Кирова были установлены береговые линии (границы водного объекта) двумя различными методами. В первом случае береговая линия проводилась по топографическому плану города масштаба 1:2 000 на основе вычисленных отметок  $H_{б/л}$ . План составлен по материалам аэрофотосъемки и отражает состояние на местности на 2008–2011 гг. Рельеф суши передан системой горизонталей с высотой сечений 1 м (полугоризонталей проведены через 0,5 м). Помимо горизонталей рельеф охарактеризован высотными отметками, а на участках с нарушенным рельефом – дополнительными условными знаками. На топографическом плане по средней линии акватории р. Вятки расставлялись расчетные точки на расстоянии 400–500 м друг от друга; в расчетных точках вычислялись значения  $H_{б/л}$ , которые в последующем выносились на

<sup>5</sup> Приказ Министерства экономического развития РФ от 1 марта 2016 г. №90 «Об утверждении требований к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, требований к точности и методам определения координат характерных точек контура здания, сооружения или объекта незавершенного строительства на земельном участке, а также требований к определению площади здания, сооружения и помещения».

береговую зону по горизонталям и высотным отметкам. Вынесенные на сушу точки соединялись плавной кривой, границей водного объекта, построенной с учетом изгибов горизонталей, высотных отметок и различных нарушений рельефа.

Таблица 3

**Ошибки прогнозирования величины  $\Delta H$  по гидролого-статистической модели**

Река – пост	$\Delta H$ , см		Разница между прогнозируемой и фактической величинами $\Delta H$ , см
	Фактическая	Прогнозируемая	
Вятка – с. Красноглинье	8	15,3	7,3
Вятка – д. Усатьевская	41	31,2	-9,8
Вятка – г. Киров	53	52,6	-0,4
Вятка – г. Котельнич	64	65,1	1,1
Вятка – пгт Аркуль	71	74,6	3,6
Вятка – г. Вятские Поляны	89	85,7	-3,3
Летка – с. Казань	29	16,4	-12,6
Чепца – с. Полом	18	20,8	2,8
Чепца – г. Глазов	15	25,4	10,4
Чепца – д. Целоусы	31	33,6	2,6
Быстрица – д. Шипицино	8	17,5	9,5
Молома – д. Пермьская	34	21,3	-12,7
Молома – д. Спасское	27	26,4	-0,6
Кильмезь – д. Вичмарь	27	31,6	4,6
Лумпун – д. Шмыки	9	13,0	4,0
Вала – с. Вавож	26	19,4	-6,6
Лобань – с. Рыбная Ватага	15	15,2	0,2
Средняя величина (без учета знака), см:		5,4	
Среднее из отрицательных отклонений, см		-6,6	
Среднее из отрицательных отклонений, см		4,6	
Наибольшее отрицательное отклонение, см		-12,7	
Наибольшее положительное отклонение, см		10,4	
Среднеквадратическое отклонение, см		4,3	
Коэффициент вариации		0,79	

Другой способ построения береговой линии р. Вятки заключается в ее установлении по космическим снимкам на дату, когда уровень воды в реке был равен фактическому среднему многолетнему уровню за безледный период, вычисленному по материалам уровнемерных наблюдений на посту Вятка – г. Киров. В настоящем исследовании оценка точности построения береговой линии проводилась с использованием двух различных по своим характеристикам и способу получения снимков, отнесенных к одной дате – 18 августа 2017 г. Первый снимок получен путем мозаицирования (композиции) небольших фрагментов, которые предоставлены компанией DigitalGlobe – коммерческим оператором нескольких гражданских спутников дистанционного зондирования Земли. Каждый фрагмент мозаики на этапе предпроцессорной подготовки был обработан в программном продукте ERDAS Imagine 2010 [11]; предобработка включала в себя импорт изображения, ортотрансформирование (устранение заклон визирной оси и рельеф), назначение проекции и координатную привязку.

Второй снимок получен со спутника Landsat 8 OLI и доступен на сайте Геологической службы США. Дешифрирование акватории р. Вятка проводилось на основе метода автономной кластеризации ISODATA в программе ERDAS Imagine 2010 [11]. Исходное изображение было преобразовано путем цветового синтеза каналов инфракрасного диапазона в сочетании 7 (Red), 6 (Green) и 5 (Blue), что позволяет с большой точностью дешифрировать водные объекты суши [12]. Первоначально в ходе классификации выделялись 20-25 классов, среди которых экспертно определялись классы, соответствующие водной поверхности. На завершающем этапе путем переклассификации классам, соответствующим водной поверхности, присваивался код «1», всем остальным классам – код «0». Полу-

ченный тематический растр конвертировался в векторный формат, а затем векторный слой сглаживался (подвергался генерализации) для устранения «пиксельной» структуры.

В результате были получены три линии, изображающие береговую линию р. Вятки в черте г. Кирова, две из которых построены по космическому снимку, а третья – по топографическому плану (рис. 2). Если оба способа установления границы водного объекта обеспечивают одинаковый результат, то положение всех трёх линий в пространстве должно совпасть; любые же несовпадения следует рассматривать как несовершенство разработанной гидролого-статистической модели и методики картографирования границы водного объекта по величине  $H_{б/л}$ .

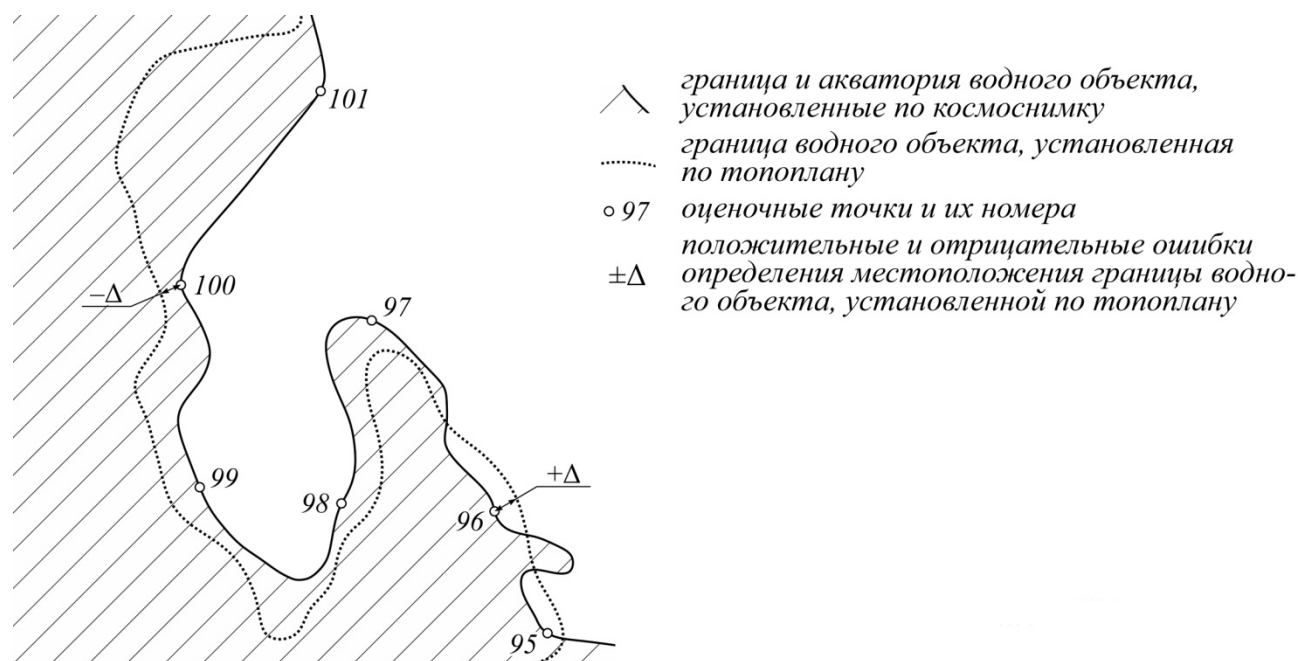


Рис. 2. Принципиальная схема определения различий в местоположении границы водного объекта на основе различных исходных данных

Для количественной оценки степени несоответствия пространственного положения границ водного объекта вдоль береговых линий, установленных по космическим снимкам, расставлялись так называемые оценочные точки на расстоянии 300 м друга от друга (рис. 2). Предварительный анализ методики выполненных работ, а также полученных результатов позволил сделать вывод, что граница водного объекта, установленная по космическим снимкам, обладает большей документальной точностью; следовательно, вычисление ошибок следует проводить по отношению к ним. От оценочных точек рассчитывалось наименьшее расстояние до береговой линии, проведенной по топографическому плану. Расстояние  $\Delta$  (ошибка определения местоположения) принималось положительным, если по топографической карте ширина акватории в створе оценочной точки оказывалась больше, чем ширина акватории по космическому снимку. В противном случае исчисляемое расстояние бралось с отрицательным знаком. В тех случаях, когда соответствие в положении линий было кардинально различным (вплоть до невозможности установления кратчайшего расстояния от оценочной точки до границы водного объекта, установленной по топографической карте) ошибки положения не рассчитывались.

Полученные в результате выполнения рассмотренной процедуры результаты показывают, что в большинстве случаев обе границы (береговая линия с топографического плана и береговая линия с одного из космических снимков) следуют параллельно друг другу на относительно небольшом расстоянии ( $\pm 10$ – $15$  м). Исключение составляют области развития песчаных пляжей, рельеф которых очень динамичен и существенно перерабатывается практически после каждого весеннего половодья, а также участки с предельно малыми уклонами земной поверхности и участки, антропогенно измененные в период между датой составления карты (2008–2011 гг.) и датой получения снимка (2017 г.). В таких случаях различия в местоположении береговых линий могли достигать нескольких десятков метров.



В распределении явно преобладают положительные ошибки (рис. 3), что свидетельствует о преувеличении ширины и площади акватории р. Вятки, построенной по топографическому плану на основе вычисленных значений  $H_{6/l}$ . Средняя ошибка отклонения (без учета знака), рассчитанная по 162 оценочным точкам на снимке Digital Globe, составила 14,1 м, а на снимке Landsat 8 OLI – 16,8 м (несколько худшие результаты во втором случае связаны, по всей видимости, с более низкой разрешающей способностью снимка Landsat). Примерно четверть длины береговых линий от их общей протяженности установлена с ошибкой, не превышающей  $\pm 5$  м, и от 40 до 50% длины береговых линий – с ошибкой, не выходящей за пределы  $\pm 10$  м. При этом средняя квадратическая погрешность определения местоположения границы водного объекта составила в обоих случаях всего 1,3 м.

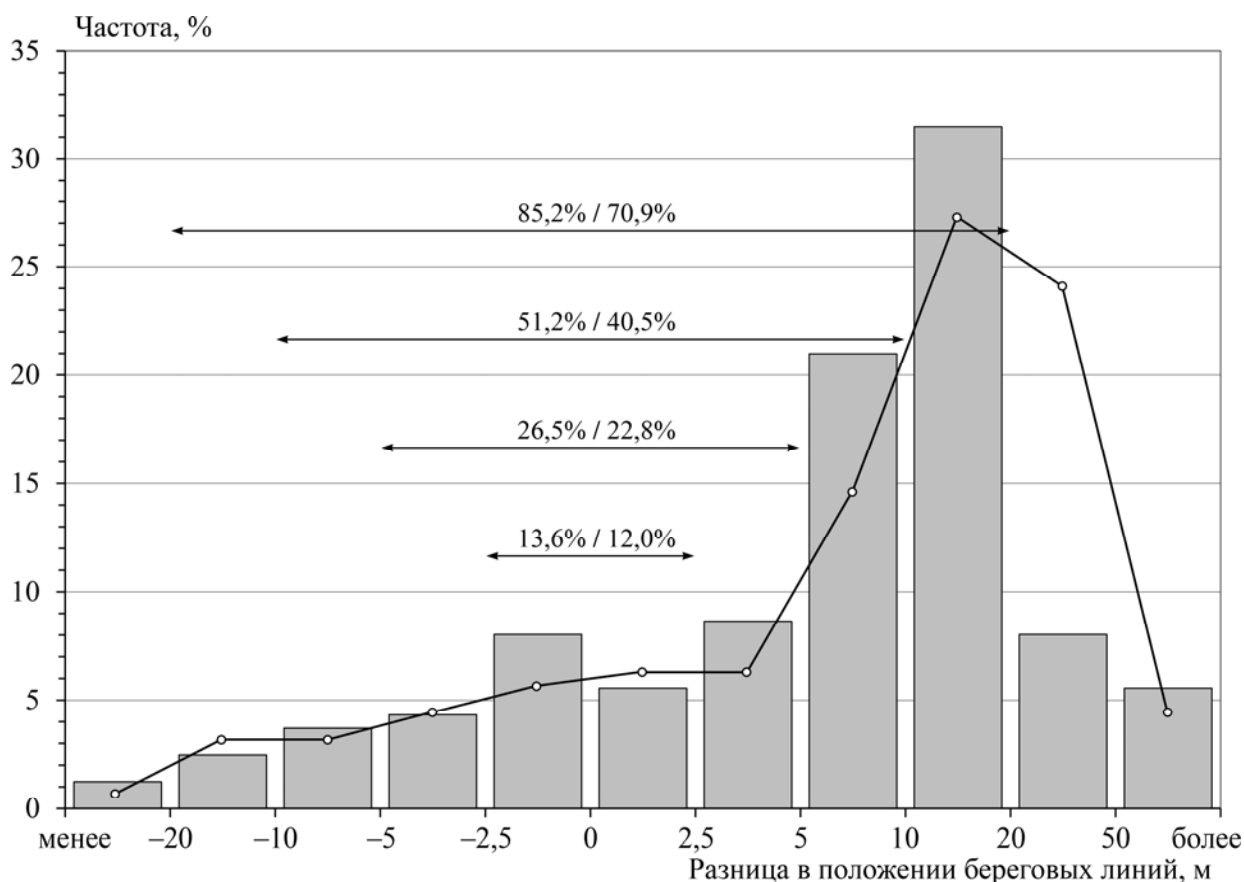


Рис. 3. Гистограмма распределения величины смещения береговой линии р. Вятки в черте г. Кирова, установленной по топографическому плану, от береговых линий, установленных по космическим снимкам DigitalGlobe (гистограмма) и Landsat 8 OLI (вариационная кривая)

*Примечание.* Подписи процентов указывают, какая доля длины береговой линии, установленной по топографическому плану, отклоняется от той же линии, установленной по космическому снимку, на величину, не превышающую значение абсциссы на концах стрелок. Первая цифра – по снимку Digital Globe, вторая – по снимку Landsat 8 OLI.

### Заключение

Установление границ водных объектов в соответствии с требованиями Водного кодекса Российской Федерации имеет большое практическое значение. Однако, несмотря на то, что Водный кодекс введен в действие с 1 января 2007 г., многие методические вопросы определения границ водных объектов до сих пор остаются открытыми. Основную сложность представляет определение средне-многолетнего уровня воды за безледный период; береговая линия, соответствующая этому уровню, служит границей многих водных объектов естественного и искусственного происхождения. В рамках настоящей работы разработана и апробирована гидролого-статистическая модель расчета искомого уровня на гидрологически неизученных водотоках, учитывающая величину водного стока, факторы его формирования и условия прохождения.

Границы применимости полученного уравнения в первую очередь определяются территориальной принадлежностью к бассейну р. Вятки, по которому оно было получено. Для водотоков других территорий необходимо построение новых моделей, в структуру которых, возможно, будет входить иной набор предикторов. Кроме того, учитывая специфику исходных данных, модель справедлива для водотоков, площадь водосбора которых составляет 1 тыс. км<sup>2</sup> и более, залесенность – от 40–50% и более, а озерность и заболоченность не превышают 0,1–0,2% и 5% соответственно.

Практическая ценность уравнения заключается в том, что для произвольной точки или отрезка водотока можно вычислить средний многолетний уровень воды за период открытого русла, по которому в дальнейшем по крупномасштабным картографическим изображениям производится определение границы водного объекта, даже при условии отсутствия гидрометрических наблюдений. Для этого достаточно по топографическим картам для искомой точки или отрезка реки определить площадь водосбора  $A$  и уклон водной поверхности  $I$ , а по картам нормы годового стока, опубликованным, например, в обобщающих монографиях [13; 14] – величину среднего многолетнего расхода воды за год  $Q$ .

Картографирование береговой линии (границы) водного объекта р. Вятки по крупномасштабному топографическому плану на основе вычисленных значений среднего многолетнего уровня воды за безледный период  $H_{б/л}$  показало хорошую сходимость с береговой линией, установленной по детальным космическим снимкам, сделанным на дату с фактической величиной  $H_{б/л}$ . Среднеквадратическая погрешность определения местоположения границы водного объекта не выходит за пределы требуемой точности, равной 5,0 м, а наибольшие ошибки связаны не столько с недостатками разработанной гидролого-статистической модели, сколько с актуальностью и качеством используемых карт.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 448 с.
2. Международное руководство по методам расчета основных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 248 с.
3. Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500. М.: Недра, 1989. 286 с.
4. Условные знаки для топографической карты масштаба 1:10 000. М.: Недра, 1977. 143 с.
5. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений / Гос. учреждение «Государственный гидрологический институт». СПб.: Нестор-История, 2005. 103 с.
6. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений / Гос. учреждение «Государственный гидрологический институт». СПб.: Нестор-История, 2009. 193 с.
7. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Опасные гидрометеорологические явления: режим, мониторинг, прогноз. Пермь: Раритет-Пермь, 2014. 296 с.
8. Центр регистра и кадастра гидротехнических сооружений Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: <http://www.gis.vodinfo.ru>
9. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. 279 с.
10. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во МГУ, 2008. 607 с.
11. ERDAS Imagine. Product Features and Comparisons: Product Description. Hexagon Geospatial. URL: <https://www.geoimage.com.au/LiteratureRetrieve.aspx?ID=180779>.
12. Quinn J.W. Band Combinations. URL: <http://web.pdx.edu/%7Eemch/ip1/bandcombinations.html>
13. Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы: научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. Ливны, 2015. 373 с.
14. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 11: Средний Урал и Приуралье. Вып. 1: Кама. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 848 с.

Поступила в редакцию 21.03.2019

Амирова Алина Рустамовна, магистрант

E-mail: [mialin95@mail.ru](mailto:mialin95@mail.ru)

Калимуллина Гульназ Ильгизаровна, магистрант

E-mail: [tanasic.com@mail.ru](mailto:tanasic.com@mail.ru)

Институт экологии и природопользования

Казанский (Приволжский) федеральный университет

420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

Мозжерин Вадим Владимирович, кандидат географических наук,  
заместитель директора по научной деятельности  
ООО «ЭкоЛидер»  
420107, Россия, г. Казань, ул. Хади Такташа, 1  
E-mail: vadim\_mozzherin@mail.ru

Хуснутдинова Валентина Владимировна, магистрант  
Институт экологии и природопользования  
Казанский (Приволжский) федеральный университет  
420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18  
E-mail: kvalentina129@inbox.ru

*A.R. Amirova, G.I. Kalimullina, V.V. Mozzherin, V.V. Khusnutdinova*

### DEVELOPMENT OF A HYDRO-STATISTICAL MODEL OF ESTABLISHING THE LIMITS OF STREAMS AND ITS VERIFICATION (ON THE EXAMPLE OF THE VYATKA-RIVER BASIN)

DOI: 10.35634/2412-9518-2019-29-2-231-242

A new unique method for establishing the shoreline of watercourses has been offered. In accordance with the Russian Water code, the border of rivers and streams is the shoreline with a long-term average annual water level for the ice-free period. That level is unknown in advance: it cannot be directly measured afield; it is not given in hydrological directories, as it is not considered to be characteristic, and on cartographic materials the outlines of water bodies are given at the average water level for the summer-autumn low flow period. To determine the desired level, the authors proposed a new method using the example of the Vyatka River. The method is based on a hydrolytic statistical model: the predicted parameter is the value of  $\Delta H$  (the excess of the long-term average water level for the ice-free period over the average level of the summer-autumn low flow period), and the predictors (factors) of the model are the conditions of flow formation and passage. These factors are connected with  $\Delta H$  by a power dependence, which has coefficients established by the least squares method from observations at 17 hydrological stations. The average calculation error  $\Delta H$  was  $5.4 \pm 2.2$  cm (significance level 0.05). The equation allows for any point or segment of the watercourse to calculate the desired level, and then establish a shoreline using large-scale maps. In this case, hydrometric observations are not needed. Mapping of the shoreline of the Vyatka River within the Kirov city and comparison of its position with the shoreline on a detailed space image received on a date close to the calculated level show that the standard error of the planned coastal position does not exceed 1.3 m, which meets the requirements to the accuracy of land boundaries of the water fund.

*Keywords:* Water Code, streams, water fund lands, limits of water objects, period of open channel, Vyatka-River basin, hydrometric observations, satellite images, Landsat 8.

#### REFERENCES

1. *Posobiye po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Manual on determination of calculated hydrological characteristics]. L.: Gidrometeoizdat, 1984, 248 p. (in Russ.).
2. *Mezhdunarodnoye rukovodstvo po metodam raschota osnovnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [International guidelines on methods for calculating basic hydrological characteristics]. L.: Gidrometeoizdat, 1984, 248 p. (in Russ.).
3. *Uslovnyye znaki dlya topograficheskikh planov masshtabov 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500* [Symbols for topographic planes in scales 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500]. M.: Nedra, 1989, 286 p. (in Russ.).
4. *Uslovnyye znaki dlya topograficheskoy karty masshtaba 1:10 000* [Symbols for topographic map in scales 1:10 000]. M.: Nedra, 1977, 143 p. (in Russ.).
5. *Metodicheskiye rekomendatsii po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik pri nalichii dannykh gidrometricheskikh nablyudeniy* [Guidelines on determining of calculated hydrological characteristics in the presence of data of hydrometric observations], State Institution «State Hydrological Institute». St.Pb: Nestor-History, 2005, 103 p. (in Russ.).
6. *Metodicheskiye rekomendatsii po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik pri otsutstvii dannykh gidrometricheskikh nablyudeniy* [Guidelines on determining of calculated hydrological characteristics in the absence of data of hydrometric observations], State Institution «State Hydrological Institute». St.Pb: Nestor-History, 2009, 193 p. (in Russ.).
7. P'yankov S.V., Shikhov A.N. [Dangerous hydrometeorological phenomena: regime, monitoring, forecast]. Perm: Raritet-Perm, 2014, 296 p. (in Russ.).

8. *Tsentr registra i kadastra gidrotekhnicheskikh sooruzheniy Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii* [Center for Register and Cadastre of Hydraulic Structures of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation]. Available at: <http://www.gis.vodinfo.ru> (accessed: 03.03.2019) (in Russ.).
9. Sikan A.V. [Methods of statistical processing of hydrometeorological information]. St.Pb.: Izd-vo RGGMU, 2007, 279 p. (in Russ.).
10. Chalov R.S. [Riverbed science: theory, geography, practice. Vol.1. Channel processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and forming conditions]. M.: Izd-vo MGU, 2008, 607 p. (in Russ.).
11. ERDAS Imagine. Product Features and Comparisons: Product Description. Hexagon Geospatial. Available at: <https://www.geoimage.com.au/LiteratureRetrieve.aspx?ID=180779> (accessed: 03.03.2019).
12. Quinn J.W. Band Combinations. Available at: <http://web.pdx.edu/~7Eemch/ip1/bandcombinations.html> (accessed: 03.03.2019).
13. *Osnovnyye gidrologicheskiye kharakteristiki rek basseyna Kamy: nauchno-prikladnoy spravochnik* [The main hydrological characteristics of the rivers of the Kama basin: scientific and practical reference book] / Ed. V.Yu.Georgievskiy. Livny, 2015, 373 p. (in Russ.).
14. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Surface water resources of the USSR]. V. 11: Middle Urals and the Urals. Iss. 1: Kama. L.: Gidrometeoizdat, 1973, 848 p. (in Russ.).

Received 21.03.2019

Amirova A.R., 2nd course master's student of Institute of Environmental Sciences

E-mail: [mialin95@mail.ru](mailto:mialin95@mail.ru)

Kalimullina G.I., 2nd course master's student of Institute of Environmental Sciences

E-mail: [tanatik.com@mail.ru](mailto:tanatik.com@mail.ru)

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlyovskaya st., Kazan, Russia, 420008

Mozzherin V.V., Candidate of Geography, Deputy Director for Scientific Activity

LLC EcoLeader

1, Khadi Taktasha st., Kazan, Russia, 420107

E-mail: [vadim\\_mozzherin@mail.ru](mailto:vadim_mozzherin@mail.ru)

Khusnutdinova V.V., 2nd course master's student of Institute of Environmental Sciences

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlyovskaya st., Kazan, Russia, 420008

E-mail: [kvalentina129@inbox.ru](mailto:kvalentina129@inbox.ru)