

УДК 556.06

Оптимизация сети снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги

**С.В. Борщ¹, Е.А. Леонтьева¹, Ю.А. Симонов¹,
А.В. Христофоров^{1,2}, И.В. Чупин^{1,2}**

¹ *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

² *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
borsch@mecom.ru, simonov@mecom.ru*

Предложены рекомендации по оптимизации наблюдательной сети, основанные на оценке возможности интерполяции данных наблюдений в каждом конкретном пункте по данным соседних. Последовательное выявление пунктов с минимальной погрешностью такой интерполяции рекомендуется выполнять при любом предполагаемом в перспективе числе пунктов в пределах рассматриваемой территории.

В целях оптимизации сети снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги определен перечень тех из них, которые рекомендуется сохранить, восстановить и закрыть. Варианты такого перечня получены при различном числе маршрутов, наблюдения на которых в будущем могут считаться целесообразными.

Показано, что при сокращении с 1990 года числа снегомерных маршрутов с 75 до 45, выбор закрываемых маршрутов был научно обоснованным в 80 % случаев.

Ключевые слова: оптимизации наблюдательной сети, погрешность интерполяции, снегомерные маршруты в бассейне Верхней Волги

Snow route network optimization in the Upper Volga basin

**S.V. Borsch¹, E.A. Leonteva¹, Yu.A. Simonov¹,
A.V. Khristoforov^{1,2}, I.V. Chupin^{1,2}**

¹ *Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;*

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
borsch@mecom.ru, simonov@mecom.ru*

The recommendations on the observation network optimization are proposed based on assessing the possibility of observation data interpolation at every point using data from neighboring points. The consecutive search of points with a minimal interpolation error is recommended for any projected number of observation sites within the studied territory.

To provide the snow route network optimization in the Upper Volga basin, three lists of routes were made: the routes to be preserved, reopened, and closed. The number of routes varied with regard to the future reasonability of snow measurement, thus providing several variants of route lists.

It is demonstrated that the choice of routes to be closed since 1990 was scientifically substantiated in 80 % of cases, although the number of routes decreased from 75 to 45.

Keywords: observation network optimization, interpolation error, snow routes in the Upper Volga basin

Введение

При долгосрочном прогнозировании весеннего стока рек бассейна Верхней Волги и притока воды в Рыбинское и Горьковское водохранилища в качестве основного предиктора учитываются осредненные по водосбору значения максимальных запасов воды в снежном покрове, которые ежегодно определяются на основе данных сети снегомерных маршрутов [2, 6].

Существовавшая в бассейне Верхней Волги до 1989 года сеть снегомерных маршрутов была практически оптимальной с точки зрения требований гидрологического прогнозирования [4, 7, 9]. За последние 28 лет произошло существенное сокращение числа снегомерных маршрутов с 75 до 45. Таким образом, оптимизация сети снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги может быть сведена к обоснованному восстановлению некоторых закрытых ранее маршрутов и закрытию других, действующих в настоящее время.

Общие рекомендации по оптимизации наблюдательной сети

Процедура закрытия и восстановления пунктов наблюдений может быть рассмотрена для произвольной гидрометеорологической характеристики Z , используемой в гидрологическом прогнозировании. В зависимости от этой характеристики в качестве таких пунктов могут рассматриваться:

- гидрологические станции и посты для определения характеристик стока в соответствующих речных створах;
- метеорологические станции для определения слоя осадков и других необходимых метеорологических характеристик;
- снегомерные маршруты для определения максимальных запасов воды в снежном покрове;
- агрометеорологические станции для определения глубины промерзания и влажности почвы.

Обозначим через m число пунктов наблюдения, которые использовались для определения характеристики Z до начала закрытия некоторых из них. К этому сроку на всех m пунктах наблюдения проводились в течение n лет. После этого прошло еще n_0 лет. Обозначим через m_0 число пунктов, действующих в настоящее время. Если после начала закрытия некоторых пунктов прошло n_0 лет, то к настоящему времени на оставшихся пунктах наблюдения ведутся уже в течение $n + n_0$ лет.

Таким образом, для каждого пункта с номером $i = 1, \dots, m$ имеется многолетний ряд значений характеристики Z продолжительностью n_i лет, которая варьирует в пределах от минимального значения n до максимального значения $n + n_0$. Этот ряд может быть использован для получе-

ния стандартных статистических оценок математического ожидания M_i и дисперсии D_i характеристики Z . Оценка коэффициента корреляции r_{ij} между многолетними колебаниями этой характеристики в пунктах $i, j = 1, \dots, m$ может быть получена на основе совместного для этих пунктов ряда наблюдений за одни и те же годы продолжительностью n_{ij} , которая также может варьировать в пределах от n до $n + n_0$.

Для каждого пункта с номером i рассматриваемая характеристика может интерполироваться по данным ближайших $k = 1 - 3$ пунктов. Значения рассматриваемой гидрометеорологической характеристики в этих пунктах целесообразно обозначить как Z_{ij} при значениях $j = 1, \dots, k$. Интерполируемое значение выражается формулой:

$$\tilde{Z}_i = M_i + \sum_{j=1}^k a_{ij} \sqrt{\frac{D_i}{D_{ij}}} (Z_{ij} - M_{ij}). \quad (1)$$

Коэффициенты a_1, \dots, a_k выражаются с помощью элементов корреляционной матрицы

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{00} & r_{01} & \dots & r_{0k} \\ r_{01} & r_{11} & \dots & r_{1k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{k0} & r_{k1} & \dots & r_{kk} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

в которой $r_{00} = r_{11} = \dots = r_{kk} = 1$; r_{0j} – коэффициент корреляции между величинами Z_i и Z_{ij} ; r_{sj} – коэффициент корреляции между величинами Z_{is} и Z_{ij} [8].

Если обозначить через A_{0j} и A_{00} алгебраические дополнения элементов r_{0j} и r_{00} в матрице \mathbf{R} , то коэффициенты в формуле (1) определяются для всех $j = 1, \dots, k$ как

$$a_{ij} = -\frac{A_{0j}}{A_{00}}. \quad (3)$$

Для каждого года разность $Z_i - \tilde{Z}_i$ между фактическим и интерполируемым значениями рассматриваемой гидрометеорологической характеристики определяет ошибку интерполяции. При условии однородности используемых рядов и отсутствия корреляции между их членами среднее значение квадрата этой ошибки равно

$$V(\tilde{Z}_i) = M[(Z_i - \tilde{Z}_i)^2] = \frac{(n-1)^2}{(n-k-1)(n-k-2)} D_i (1 - R_i^2), \quad (4)$$

где R_i – множественный коэффициент корреляции между величиной Z_i и величинами Z_{i1}, \dots, Z_{ik} [1]. Этот показатель тесноты зависимости характеристики Z для пункта i от ее значений для k соседних пунктов выражается через определитель $|R|$ корреляционной матрицы \mathbf{R} и алгебраическое дополнение A_{00} элемента r_{00} формулой:

$$R_i = \sqrt{1 - \frac{|R|}{A_{00}}}. \quad (5)$$

В целях оптимизации процедуры восстановления и закрытия пунктов наблюдения, используемых для определения характеристики Z , погрешность ее интерполяции следует определять не только для закрывшихся, но и для оставшихся пунктов. Содержащийся в формуле (4) множитель при величине $D_i(1 - R_i^2)$ практически одинаков и близок к единице для всех m пунктов. Исходя из этого, оптимизация конфигурации рассматриваемой сети гидрометеорологических наблюдений может опираться на анализ значений среднеквадратической погрешности интерполяции $\tilde{\sigma}_i = \sqrt{D_i(1 - R_i^2)}$ для всех $i = 1, \dots, m$.

При определении оптимального числа сохраняемых, восстанавливаемых и закрываемых пунктов наблюдений в качестве безусловных кандидатов на закрытие следует считать пункты с аномально низкими погрешностями интерполяции $\tilde{\sigma}_i$. Для выявления таких пунктов рекомендуется использовать критерий Граббса – Смирнова или критерий Диксона [8]. Оба этих статистических критерия предназначены для обнаружения резко выделяющихся членов ряда независимых случайных величин, подчиняющихся нормальному распределению вероятностей. Распределение вероятностей оценок $\tilde{\sigma}_i$ может иметь значительную положительную асимметрию, поэтому рекомендуется анализировать их логарифмы $b_i = \ln \tilde{\sigma}_i$ для всех $i = 1, \dots, m$. Ряд этих величин располагается в возрастающем порядке, образуя вариационный ряд $b_{(1)} \leq \dots \leq b_{(m)}$, в котором наименьший член ряда равен $b_{(1)}$, а наибольший равен $b_{(m)}$.

Уровень значимости каждого критерия, то есть вероятность ошибочного выделения значения $b_{(1)}$ в качестве аномально низкого, рекомендуется принимать равным 10 %.

Критерий Граббса – Смирнова определяет значение $b_{(1)}$ в качестве аномально низкого, если выполняется неравенство:

$$G = \frac{\bar{b} - b_{(1)}}{S_b} \geq 3, \quad (6)$$

где \bar{b} и S_b – стандартные оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения, полученные по ряду $b_{(1)}, \dots, b_{(m)}$.

Критерий Диксона определяет значение $b_{(1)}$ в качестве аномально низкого, если выполняется неравенство:

$$D = \frac{b_{(2)} - b_{(1)}}{b_{(n)} - b_{(1)}} \geq 0,3. \quad (7)$$

Если для пункта с номером i с наименьшими значениями $\tilde{\sigma}_i$ и $b_i = b_{(1)}$ выполняется одно из приведенных неравенств, его надо рассматривать в качестве безусловного кандидата на закрытие. После исключения этого пункта данные критерии следует применять к оставшимся членам укороченного ряда значений величины b с пересчетом всех статистических характеристик в неравенствах (6) и (7). И так далее вплоть до выявления всех пунктов с аномально низкими значениями погрешности интерполяции $\tilde{\sigma}_j$ и, следовательно, значениями b_j в качестве кандидатов на закрытие. Их число l_{\min} определяет нижний предел для оптимального числа закрываемых пунктов, а число $m - l_{\min}$ определяет верхний предел для числа сохраняемых и восстанавливаемых пунктов.

Для оставшихся пунктов рекомендуется руководствоваться следующими общими правилами.

1. Закрытие пункта с номером i и сохранение пункта с номером j следует считать необоснованным, если выполняется неравенство $\tilde{\sigma}_i > \tilde{\sigma}_j$.

2. Для кластера, образованного двумя и более близко расположенными пунктами с высокой синхронностью многолетних колебаний характеристики Z и, следовательно, низкими значениями погрешности ее интерполяции, должен быть оставлен один пункт с наибольшей дисперсией D_i .

3. Рекомендуется применение поливариантного подхода, который состоит в том, что для заданного числа m_0 сохраняемых и восстанавливаемых пунктов определяется оптимальный набор $m - m_0$ подлежащих закрытию пунктов, данные которых могут интерполироваться по оставшимся m_0 пунктам наилучшим образом.

4. При фиксированном числе сохраняемых пунктов m_0 закрытию должны подлежать $m - m_0$ пунктов с наименьшими значениями погрешности интерполяции $\tilde{\sigma}_i$.

5. Первым должен исключаться пункт с номером i , который имеет наименьшую погрешность интерполяции $\tilde{\sigma}_i$.

6. После исключения этого пункта для всех оставшихся пунктов с номерами $j \neq i$ значения погрешности интерполяции $\tilde{\sigma}_j$ должны быть

пересчитаны таким образом, чтобы пункт с номером i уже не мог учитываться при получении интерполируемого значения. Это достигается путем исключения из корреляционной матрицы \mathbf{R} строки и столбца с номером i и последующего пересчета множественного коэффициента корреляции R_j .

7. Действия 5 и 6 должны последовательно повторяться вплоть до достижения заданного числа $m - m_0$ исключенных пунктов.

8. Оптимальное число и перечень оставляемых и закрываемых пунктов следует уточнять с учетом природных условий водосбора, специфики рассматриваемой гидрометеорологической характеристики и экономической целесообразности [3, 5, 10].

Предложения по оптимизации сети снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги

В бассейне Верхней Волги сокращение числа снегомерных маршрутов началось с 1990 года. До этого в течение $n = 14$ лет периода с 1976 по 1989 г. при получении прогнозов использовались данные $m = 75$ снегомерных маршрутов. В течение последних $n_0 = 28$ лет было закрыто $m - m_0 = 30$ снегомерных маршрутов. В настоящее время используются данные $m_0 = 45$ снегомерных маршрутов, для каждого из которых имеется ряд наблюдений за $n + n_0 = 42$ года. Расположение всех имевшихся ранее и действующих в настоящее время снегомерных маршрутов показано на рисунке.

В таблице для каждого из 75 снегомерных маршрутов приведены оценки множественного коэффициента корреляции R_i получаемых на нем наблюдений с данными соседних пунктов, а также среднеквадратической погрешности $\tilde{\sigma}_i$ их возможной интерполяции. Там же приведены их ранги, которые соответствуют номеру каждого снегомерного маршрута при расположении всех пунктов в порядке возрастания погрешностей интерполяции. Закрытые к настоящему времени снегомерные маршруты выделены жирным шрифтом.

Ранг 1 имеет маршрут «Тургиново» с минимальной погрешностью интерполяции $\tilde{\sigma} = 5,4$ мм и, следовательно, минимальным значением $b_{(1)} = 1,69$. Ранг 2 имеет маршрут «Ржев» с погрешностью интерполяции $\tilde{\sigma} = 6,5$ мм и вторым по величине снизу значением $b_{(2)} = 1,87$. Максимальный ранг 75 имеет маршрут «Ефимовская» с максимальной погрешностью интерполяции $\tilde{\sigma} = 33,6$ мм и, следовательно, максимальным значением $b_{(m)} = 3,51$.



Рис. Расположение снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги по состоянию на 1989 и 2017 годы.

Fig. Snow routes in the Upper Volga basin in 1989 and 2017.

Полученные по ряду $b_{(1)}, \dots, b_{(m)}$ стандартные оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения равны $\bar{b} = 2,81$ и $S_b = 0,43$. Статистика G критерия Граббса – Смирнова равна 2,60 и, следовательно, неравенство (6) не выполняется. Статистика D критерия Диксона равна 0,10 и, следовательно, неравенство (7) также не выполняется. Таким образом, среди всех 75 снегомерных маршрутов нет ни одного с аномально низкой погрешностью интерполяции, который можно было бы рассматривать в качестве безусловного кандидата на закрытие.

В связи с этим использован поливариантный подход при заданном числе $m - m_0$ подлежащих закрытию снегомерных маршрутов, равном 10, 20 и 30, и соответствующем числе m_0 сохраняемых и восстанавливаемых маршрутов, равном 65, 55, 45.

Последовательное выполнение изложенных выше рекомендаций позволило определить обоснованный перечень снегомерных маршрутов, которые должны быть сохранены или восстановлены. В табл. 1 для каждого варианта знаком «+» помечены ранее закрытые снегомерные маршруты, подлежащие восстановлению, а знаком «-» помечены маршруты, подлежащие окончательному закрытию.

Таблица. Характеристики снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги
Table. Snow route characteristics in the Upper Volga basin

Маршруты	R_i	$\tilde{\sigma}_i$	Ранги	$m - m_0 = 10$	$m - m_0 = 20$	$m - m_0 = 30$
Троицкое	0,78	12	17	+	-	-
Белый	0,86	22,6	55			
Болшево	0,92	14,5	24	+	+	-
Волоколамск	0,87	15,2	29			-
В. Волочек	0,91	16,2	32			
Вязьма	0,87	9,3	8	-	-	-
Гагарин	0,84	18,4	41			
Емельяново	0,92	12,1	18	+	-	-
Тверь	0,87	22,6	56			
Кувшиново	0,96	6,9	4	-	-	-
Лихославль	0,77	17,1	36	+	+	+
Мол. Туд	0,81	16,1	30	+	+	-
Осташков	0,87	18	39			
Ржев	0,98	6,5	2	-	-	-
Сычевка	0,98	6,9	3	-	-	-
Торжок	0,91	18,7	42			
Тургиново	0,98	5,4	1	-	-	-
Толмачи	0,96	7,2	6	-	-	-
Старица	0,84	17,1	35			
Высоково	0,86	21,5	51	+	+	+
Дмитров	0,79	18,3	40			
Клин	0,85	17,4	37			
Нушполы	0,77	16,5	34	+	+	+
Переяславль-Зал.	0,7	30,3	72			
Углич	0,83	14,7	27	+	+	-
Анненский Мост	0,95	10,5	10	-	-	-
Бабаево	0,76	20,7	47			
Белозерск	0,68	21,4	50			
Б.Судское	0,95	12,2	19	+	-	-
Вытегра	0,68	27,1	68			
Ефимовская	0,76	33,6	75			
Кириллов	0,96	7	5	-	-	-
Конево	0,72	29,3	71			
Тихвин	0,74	27,6	69			
Семишино	0,81	7,3	7	-	-	-
Тургаш	0,91	10,8	11	+	-	-
Устряка	0,64	11,4	14	+	-	-

Маршруты	R_i	$\tilde{\sigma}_i$	Ранги	$m - m_0 = 10$	$m - m_0 = 20$	$m - m_0 = 30$
Чарозеро	0,72	26	64			
Череповец	0,8	19,9	46	+	+	+
Бежецк	0,88	14,7	26			-
Бологое	0,88	13	20		-	-
Кесьма	0,8	11,8	16	+	-	-
Кр. Холм	0,83	18,7	43			
Максатиха	0,89	16,2	33			
Милюшино	0,88	13,3	22	+	+	-
Охоны	0,85	17,5	38			
П. Володарское	0,86	11,7	15	+	-	-
Окуловка	0,64	19,4	44	+	+	+
Устюжна	0,59	25,3	63			
Боровичи	0,81	16,1	31	+	+	+
Буй	0,72	23,7	60			
Галич	0,72	21,9	52			
Данилов	0,76	26	65			
Кострома	0,78	22,7	57			
Рябцево	0,75	14,5	23	+	+	-
Солигалич	0,9	9,8	9	-	-	-
Чухлома	0,7	23,4	59			
Ямково	0,7	23,9	62			
Георгиевское	0,89	14,6	25	+	+	-
Екимцево	0,62	31,8	73			
Макарьев	0,72	20,9	49			
Мантурово	0,61	32,1	74			
М. Березово	0,73	26,2	66			
Н. Полома	0,73	28,4	70			
Гаврилов Ям	0,82	19,9	45			
Кинешма	0,95	11,4	12		-	-
Н. Писцово	0,95	11,4	13		-	-
Приволжск	0,82	20,8	48			
Пучеж	0,76	22	54			
Ростов Яр.	0,76	23,8	61			
Тутаев	0,74	26,6	67			
Шмаки	0,82	15	28	+	+	-
Юрьеvec	0,77	23	58			
Юрово	0,91	13,3	21	+	+	-
Ярославль	0,81	21,9	53			

В случае окончательного закрытия $m - m_0 = 10$ снегомерных маршрутов рекомендуется:

- 1) восстановить снегомерные наблюдения на 21 ранее закрытом маршруте;
- 2) оставить закрытыми 9 снегомерных маршрутов;
- 3) дополнительно закрыть один действующий маршрут у г. Вязьма.

В случае окончательного закрытия $m - m_0 = 20$ снегомерных маршрутов рекомендуется:

- 1) восстановить снегомерные наблюдения на 14 ранее закрытых маршрутах;
- 2) оставить закрытыми 16 снегомерных маршрутов;
- 3) дополнительно закрыть 4 действующих снегомерных маршрута.

В случае окончательного закрытия $m - m_0 = 30$ снегомерных маршрутов рекомендуется:

- 1) восстановить снегомерные наблюдения на 6 ранее закрытых маршрутах;
- 2) оставить закрытыми 24 снегомерных маршрута;
- 3) дополнительно закрыть 6 действующих снегомерных маршрутов.

Последний вариант заслуживает особого внимания, так как фактическое число $m - m_0$ закрытых снегомерных маршрутов равно именно 30. Анализ погрешностей пространственной интерполяции максимальных запасов воды в снежном покрове приводит к выводу о целесообразности оставить закрытыми 24 снегомерных маршрута из 30. Это свидетельствует о том, что сделанный ранее выбор закрываемых снегомерных маршрутов в 80 % случаев был научно обоснованным.

Заключение

Предложения по оптимизации сети снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги исходят из того, что до 1990 года эта сеть была достаточной. Это позволяет ограничиться решением вопроса о восстановлении одних маршрутов и закрытии других.

Предлагаемые рекомендации по оптимизации наблюдательной сети основаны на оценке возможности интерполяции данных наблюдений в каждом конкретном пункте по данным соседних. В качестве кандидатов на закрытие следует считать пункты, для которых погрешность такой интерполяции минимальна. Последовательный перебор всех действующих в настоящее время или в прошлом пунктов рекомендуется выполнять при любом заданном числе пунктов, в которых предполагается вести наблюдения в будущем. Это число должно устанавливаться исходя из природных условий территории, специфики наблюдаемой гидрометеорологической характеристики и экономической целесообразности.

На основе этих рекомендаций из 75 действовавших ранее снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги выявлены те, которые должны быть сохранены, восстановлены или окончательно закрыты при их заданном суммарном числе, равном 45, 55 и 65. При этом число подлежащих восстановлению маршрутов, соответственно, равно 6, 14 и 21.

Список литературы

1. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 355. 198 с.
2. Змиева Е.С., Комаров В.Д., Сапожников В.И. Методы прогнозов весеннего притока воды в водохранилища Волжско-Камского каскада // Труды Гидрометцентра СССР. 1967. Вып. 8. С. 25-49.
3. Кондратюк В.И., Покровский О.М., Светлова Т.П. О принципах построения наземной сети // Труды ГГО. 1999. Вып. 547. С. 3-14.
4. Наставление по глобальной системе обработки данных и прогнозирования Том 1 // ВМО-№ 485. Женева, 2010. 37 с.
5. Покровский О.М. О рационализации региональных наблюдательных сетей // Метеорология и гидрология. 2000. № 8. С. 5-21.
6. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 356 с.
7. Руководство по гидрологической практике. Сбор и обработка данных, анализ, прогнозирование и другие применения // ВМО-№ 168. 1994. 808 с.
8. Христофоров А.В., Юмина Н.М. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Изд-во АИП, 2017. 151 с.
9. Mishra A.K., Coulibaly P. Developments in hydrometric network design: A Review // Rev. Geophys. 2009. Vol. 47. P. 1-24, doi:10.1029/2007RG000243.
10. Van Dijk M.J., Rienties T.H. Geostatistics and Hydrology. Part 3: Hydro-Meteorological Network Design. Report no. 59, 1994. 29 p.

References

1. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Ocenka kachestva prognozov rechnogo stoka [Hydrologic flow forecast verification]. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].
2. Zmиеva E.S., Komarov V.D., Sapozhnikov V.I. Metody prognozov vesennego pritoka vody v vodohranilishcha Volzhsko-Kamskogo kaskada. *Trudy Gidromettsentra SSSR*, 1967, vol. 8, pp. 25-49 [in Russ.].
3. Kondratuk V.I., Pokrovskiy O.M., Svetlova T.P. O principah postroeniya nazemnoy seti. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, 1999, vol. 547, pp. 3-14. [in Russ.].
4. Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. WMO-No. 485. Geneva: WMO, 2010, vol. 1, 37 p.
5. Pokrovskii O. M. A Rational Location of Regional Observation Network. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2000, no. 8, pp. 5-21. [in Russ.].

6. *Rukovodstvo* po gidrologicheskim prognozam. Part. 1. Dolgosrochnye prognozy ehlementov vodnogo rezhima rek i vodohranilishch. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1989, 356 p. [in Russ.].
7. Guide to Hydrological Practices. Fifth edition. WMO-No.168. Geneva: WMO, 1994, 808 p.
8. *Khristoforov A.V., Yumina N.M.* Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika. Moscow: APR publ., 2017, 151 p. [in Russ.].
9. *Mishra A.K., Coulibaly P.* Developments in hydrometric network design: A Review. *Rev. Geophys.* 2009, vol. 47, pp. 1-24, doi:10.1029/2007RG000243.
10. *Van Dijk M.J., Rienties T.H.* Geostatistics and Hydrology. Part 3: Hydro-Meteorological Network Design. Report no. 59, 1994, 29 p.

*Поступила в редакцию 16.06.2018 г.
Received by the editor 16.06.2018.*