

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО ЛЕДОХОДНОГО УРОВНЯ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА НА ПРИМЕРЕ РЕК БАСЕЙНА СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

А.Э. Сумачев

Государственный гидрологический институт, a-sumachev@mail.ru

Целью работы является внедрение в практику гидрологических прогнозов нового предиктора для прогнозирования максимального ледоходного уровня — разности толщины льда в пункте наблюдения и в пункте, расположенном ниже по течению. Для этого рассмотрен ледовый режим рек бассейна Северной Двины в современных климатических условиях за период 1950—2015 гг. Представлены результаты анализа линейных трендов продолжительности ледостава и максимальной толщины льда. Показана возможность и обоснованность применения разности максимальной толщины льда в качестве предиктора для прогнозирования максимального ледоходного уровня с использованием регрессионных уравнений и искусственных нейронных сетей. Представлены две модели для прогнозирования максимального ледоходного уровня.

Ключевые слова: ледовый режим, Северная Двина, прогнозирование, нейронные сети, толщина льда.

ASSESSMENT OF THE DIFFERENCE IN ICE THICKNESS FOR FORECASTING THE MAXIMUM ICE DRIFT LEVEL OF THE NORTHERN DVINA BASIN RIVERS AS AN EXAMPLE

A. Sumachev

State Hydrological Institute, a-sumachev@mail.ru

The aim of the work is to introduce new predictor into practice of hydrological forecasts of maximum ice drifting level — the difference in ice thickness at the observation point and at the downstream point. For this purpose, the ice mode of the rivers of the Northern Dvina basin under current climatic conditions for the period 1950—2015 is considered. The results of the analysis of linear trends in the duration of freeze up and maximum ice thickness are presented. The possibility and validity to apply the difference in the maximum ice thickness as a predictor to forecast the maximum ice drifting level, using regression equations and artificial neural networks is shown. Two maximum ice drifting level predicting models are presented as well.

Keywords: ice mode, Northern Dvina, prediction, neural networks, ice thickness.

Введение

Прогнозирование основных гидрологических характеристик, в том числе характеристик ледового режима, возможно с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС). В ходе ранее выполненной работы [10] был предложен новый, ранее не рассматриваемый предиктор для прогнозирования максимального уровня воды при ледоходе — разность максимальной толщины льда в пункте наблюдения и ниже по течению. Однако ранее не был подробно рассмотрен ледовый режим и данный параметр не был физически обоснован.

Максимальная толщина льда является важным предиктором при прогнозировании максимального уровня ледохода, в особенности при образовании затора льда [2]. Поэтому во все уравнения для прогнозирования максимального заторного уровня входит максимальная толщина льда. К примеру, В. А. Бузин предлагает использовать такие параметры, как максимальная толщина льда и максимальный уровень воды в начале ледостава, для прогнозирования максимального заторного уровня р. Сухоны у д. Каликино с заблаговременностью 35 суток. Полученное им уравнение обладает коэффициентом корреляции 0,70, а оправдываемость прогнозов на 15 % превышает природную обеспеченность среднего уровня (46 %). При этом факт образования затора оценивается в зависимости от высоты ожидаемого уровня. Вероятность образования затора льда рассчитывается косвенным методом по величине максимального ледоходного уровня [2]. Таким образом, максимальный заторный уровень заменяется ледоходным.

В настоящей работе поставлена цель: дополнительно ввести в практику гидрологических прогнозов новый предиктор — разность максимальных значений толщины льда в пункте наблюдения и ниже по течению. Для достижения обозначенной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) оценить значимость линейных трендов максимальных за зиму значений толщины льда на реках бассейна Северной Двины;
- 2) составить корреляционную матрицу зависимости максимального ледоходного уровня ($H_{\text{лдох}}$) от максимальной толщины льда ($h_{\text{д}}$) и разности максимальных значений толщины льда в пункте наблюдения и ниже по течению ($\Delta h_{\text{д}}$);
- 3) дать физическое обоснование предлагаемого параметра и рекомендации по его использованию.

Материалы и методы

В работе использована сформированная база гидрологических данных за период с 1950 по 2015 г. Все посты, начиная с верхнего, для вычисления разности толщины льда были разбиты на пары (табл. 1).

Для анализа были использованы данные о максимальной толщине льда, датах начала и конца ледовых явлений, максимальном уровне воды в начале ледостава и максимальном уровне воды при ледоходе.

Расчет разности толщины льда для прогнозирования максимального ледоходного уровня воды в расчетном пункте наблюдения производился по формуле

$$\Delta h = h_{\text{max,н}} - h_{\text{max,п}}, \quad (1)$$

где Δh — разность толщины льда, $h_{\text{max,н}}$ — максимальная толщина льда в створе ниже по течению, $h_{\text{max,п}}$ — максимальная толщина льда в расчетном створе.

В работе использованы методы математической статистики и искусственного интеллекта. Значимость линейных трендов оценена при помощи коэффициента корреляции при уровне значимости, равном 5 % [5].

В целях долгосрочного прогнозирования максимального ледоходного уровня было составлено множественное уравнение регрессии и обучены нейронные сети типа радиально базисной функции (RBF). В качестве критерия оправдываемости

Гидрологические характеристики пунктов наблюдения

Река	Гидрологический пункт	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Уровень (см) выхода воды на пойму выше нуля графика поста
Сухона	г. Тотьма	277	34800	823
	д. Каликино	39	49200	885
	г. Великий Устюг	3	50300	936
Северная Двина	д. Медведки	718	86900	559
	г. Котлас	675	88300	550—580
	д. Усть-Курье	657	209000	450
	д. Абрамково	520	220000	б/п
	с. Нижняя Тойма	455	227000	700
	д. Сидоровская	380	236000	600
	д. Березник	346	278000	750
	д. Звоз	279	285000	700
	с. Усть-Пинега	131	348000	б/п
	Вычегда	с. Малая Кужба (Усть-Кулом)	662	26500
с. Сторожевск		546	38200	500
г. Сыктывкар		416	66900	460

каждого отдельного прогноза или их совокупности служит допустимая ошибка $\delta_{\text{доп}}$. Оправдавшимися считаются прогнозы, ошибка которых не превышает $\delta_{\text{доп}}$ [8]. Также использовалось отношение S/σ [8] и коэффициент Нэша — Сатклиффа [4, 8], который изменяется от 0 до 1 и характеризует качество прогнозов, составленных с использованием модели.

Таким образом, коэффициент Нэша — Сатклиффа представляет собой отношение суммы квадратов ошибок прогноза к сумме квадратов ошибок прогнозов, данных по среднему значению. В идеальном случае дробь обращается в нуль, а коэффициент Нэша — Сатклиффа будет равен единице. Если же модель прогнозирует не лучше среднего значения, коэффициент Нэша — Сатклиффа будет равен нулю. Эти свойства позволяют использовать коэффициент Нэша — Сатклиффа для оценки результатов, полученных в результате применения метода нейронных сетей [10].

Обсуждение и выводы

Повышение средней зимней температуры [8] отразилось на ледовом режиме рек. Дата установления устойчивого ледостава сместилась на более поздние сроки; разрушение ледяного покрова происходит раньше обычного; продолжительность ледового периода уменьшается примерно на 20 дней (рис. 1).

В результате изменения климата изменяются не только сроки, но и характер ледовых явлений. Всё чаще при потеплении наблюдается процесс замерзания, в ходе которого ледообразование происходит в основном внутри водной массы, доля же льда поверхностного происхождения сокращается. После установления

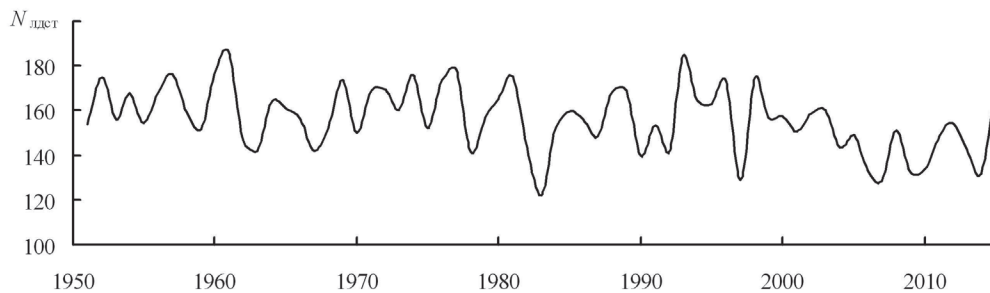


Рис. 1. Средняя продолжительность ледостава $N_{\text{ледт}}$ (число дней) на Северной Двине.

ледостава, зачастую неполного, длительное время сохраняются полыньи, которые являются основным источником шуги. В результате увеличения количества шуги и осенней водности рек в руслах последних все чаще образуются мощные зазоры, которые при определенных условиях весной становятся очагами заторов льда [2].

Максимальная толщина льда уменьшается во всех рассмотренных пунктах наблюдений на р. Сухоне, но только в двух пунктах на р. Северная Двина. В городе Сыктывкаре линейный тренд оценен за период 1950—1984 гг., что связано с прекращением наблюдений за толщиной льда в 1984 г. (табл. 2, рис. 2).

Максимальная толщина льда является важным предиктором при прогнозировании максимальных заторных уровней весеннего половодья [2]. При ее уменьшении максимальные уровни, обусловленные процессами заторообразования, должны уменьшаться, но в связи с ростом дисперсии уровней воды вначале этого

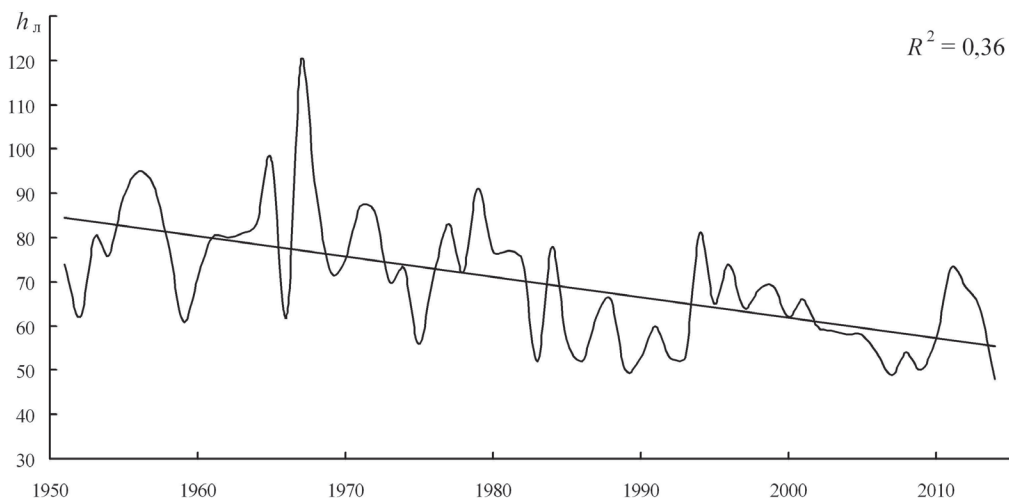


Рис. 2. Многолетнее изменение и тренд максимальной за зиму толщины ледяного покрова $h_{\text{л}}$ (см) р. Сухоны у г. Великий Устюг.

Оценка статистической значимости линейных трендов максимальной за зиму толщины льда по данным гидрологических пунктов

Река	Пункт	R	Значимость R
Сухона	г. Тотьма	-0,5	+
	д. Каликино	-0,34	+
	г. Великий Устюг	-0,60	+
Северная Двина	д. Медведки	0,03	-
	г. Котлас	-0,36	+
	д. Усть-Курье	-0,13	-
	д. Абрамково	0,04	-
	с. Нижняя Тойма	0,07	-
	д. Сидоровская	0,1	-
	д. Березник	-0,14	-
	д. Звоз	-0,49	+
	с. Усть-Пинега	-0,2	-
	с. Малая Кужба	-0,42	+
Вычегда	с. Сторожевск	-0,16	-
	г. Сыктывкар	0,64	+

не происходит, и наводнения на реке Сухоне в районе г. Великий Устюг в 1998, 2013 и 2016 гг. тому подтверждение.

В более ранних исследованиях было выявлено [2, 3], что с начала 80-х годов прошлого века климатический фактор приводит к изменению детерминированных вкладов отдельных факторов в формирование максимальных заторных уровней воды северных рек России.

Если до 70-х годов XX века формирование максимального заторного уровня определялось условиями вскрытия рек, то начиная с 70-х годов все большее значение приобретает зашугованность речного русла. Таким образом, неравномерное повышение температуры воздуха внутри зимне-весеннего сезона приводит к изменению условий формирования весеннего половодья, но при этом не оказывает значительного влияния на повторяемость и масштаб заторных наводнений, которые по-прежнему определяются естественной изменчивостью природных явлений [2, 3].

Разность значений максимальной толщины льда в пункте наблюдения и ниже по течению является важной характеристикой, отражающей градиент прочности льда. Вполне очевидно, что максимальный уровень ледохода и возможность образования затора льда обуславливается многими параметрами, и в первую очередь параметрами самого русла. Именно русло и направление течения определяют физическую возможность образования заторов льда. В большинстве случаев эти характеристики остаются постоянными, что позволяет не рассматривать их в качестве предикторов, однако отмечается уменьшение числа случаев заторообразования при дноуглубительных и других работах, направленных на увеличение пропускной способности русла.

К предикторам, определяющим характер ледохода и максимальный уровень воды при ледоходе за конкретный год, можно отнести: порядок вскрытия рек, максимальный уровень воды в начале ледостава и в начале ледохода, температуру воздуха как характеристику дружности весеннего половодья, максимальную толщину льда как характеристику его прочности, разность значений толщины льда в пункте наблюдения и ниже по течению как характеристику градиента прочности.

При определении градиента прочности по разности значений толщины льда возникает несколько проблем, в первую очередь связанных с расположением пунктов наблюдений и неоднородностью льда, а значит, и его прочностью. Пункты наблюдений могут находиться на значительном удалении друг от друга, а отдельные пункты наблюдений могут подвергаться антропогенному воздействию или находиться в местах слияния рек, что искажает естественную картину распределения толщины льда и приводит к ошибкам при вычислении градиента прочности подобным путем. В связи с этим автор не рекомендует использовать данный предиктор исходя из формальных соображений. На затороопасных участках толщину льда необходимо измерять не только на участке поста, но и в местах потенциального образования затора льда ниже поста.

Несмотря на указанные выше недостатки рассматриваемого предиктора, его можно попытаться использовать даже при разработке универсальных методик прогнозирования. Для этого следует разделить разность значений толщины льда в пунктах наблюдений на расстояние между ними и ввести дополнительный предиктор — угол, образованный линией, соединяющей два гидрологических поста, и направлением на север. Полученная связь между разностью максимальных значений толщины льда и максимальным уровнем ледохода не является линейной (рис. 3), поэтому использование данного предиктора в уравнениях линейной регрессии затруднено.

Разность значений толщины льда может принимать как положительные, так и отрицательные значения. В случае отрицательных значений связь, как правило, отсутствует (см. рис. 3) — максимальный ледоходный уровень определяется другими предикторами. При положительных значениях наблюдается значительный рост коэффициента корреляции, и, если рассматривать лишь положительные значения разницы в толщинах льда, можно говорить об увеличении коэффициента корреляции на всех 14 пунктах наблюдения.

Из рис. 3 видно полное отсутствие связи при значениях, близких к нулю. По мере увеличения значений связь возрастает, и на отрезке $\Delta h_{\text{л}}$ от 0 до 27 коэффициент корреляции составляет 0,60.

Зависимости, подобные этой, достаточно сложно применять в линейных уравнениях регрессии. Данные зависимости могут быть использованы в алгоритмизированных или нелинейных методиках; также возможно использование подобных зависимостей в нейросетевых моделях. Автором рассчитаны парные коэффициенты корреляции между максимальным ледоходным уровнем, максимальной толщиной льда и разностью значений толщины льда. В табл. 3 представлены результаты расчета.

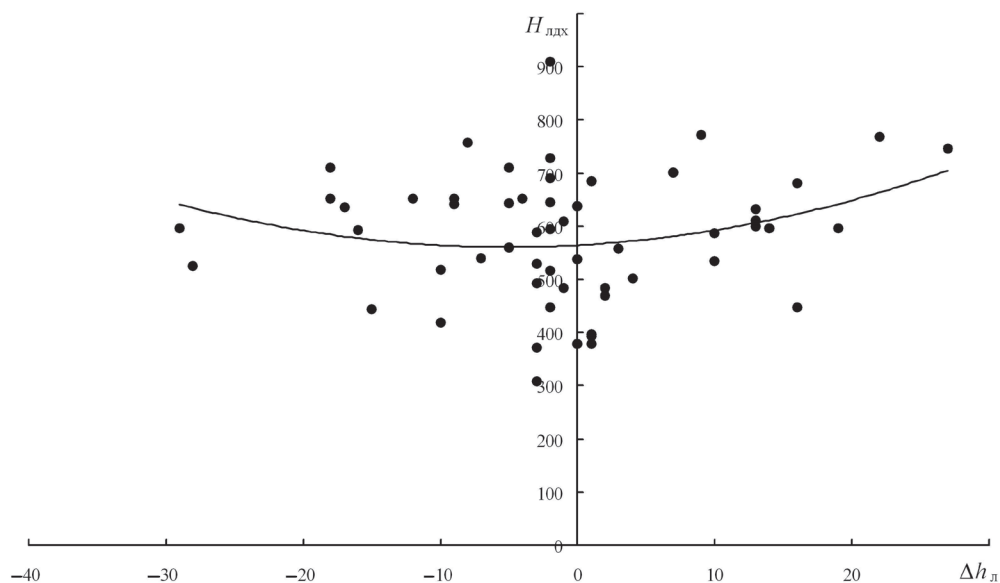


Рис. 3. Связь разности значений максимальной толщины льда $\Delta h_{\text{л}}$ (см) в с. Нижняя Тойма и д. Абрамково с максимальным ледоходным уровнем $H_{\text{лдж}}$ (см) в д. Абрамково, Северная Двина.

Таблица 3

Значения парных коэффициентов корреляции между максимальным ледоходным уровнем и максимальной толщиной льда ($R_{H_{\text{лдж}} - h_{\text{л}}}$) и между максимальным ледоходным уровнем и разностью максимальных значений толщины льда ($R_{H_{\text{лдж}} - \Delta h_{\text{л}}}$)

Река	Пункты для расчета $\Delta h_{\text{л}}$	$R_{H_{\text{лдж}} - \Delta h_{\text{л}}}$	$R_{H_{\text{лдж}} - h_{\text{л}}}$
Сухона	г. Тотыма — д. Каликино	0,24	0,06
	д. Каликино — г. Великий Устюг	-0,20	0,51
	г. Великий Устюг — д. Медведки	0,18	-0,02
Северная Двина	д. Медведки — г. Котлас	0,30	-0,11
	г. Котлас — д. Усть-Курье	-0,49	0,42
	д. Усть-Курье — д. Абрамково	0,23	-0,01
	д. Абрамково — с. Нижняя Тойма	0,11	0,08
	с. Нижняя Тойма — д. Сидоровская	0,07	0,26
	д. Сидоровская — д. Березник	-0,18	0,35
	д. Березник — д. Звоз	-0,12	0,27
Вычегда	д. Звоз — с. Усть - Пинега	0,09	0,08
	с. Малая Кужба — с. Сторожевск	-0,10	0,29
	с. Сторожевск — г. Сыктывкар	-0,14	0,17

Из данных табл. 3 можно сделать вывод о том, что в 7 из 13 случаев наблюдается большой коэффициент корреляции для пары: максимальный ледоходный

уровень — разность значений максимальной толщины льда. Наличие отрицательных коэффициентов корреляции объясняется расположением гидрологических постов в местах слияния рек. В большинстве случаев отрицательных коэффициентов корреляции для пары $H_{\text{лдж}} — \Delta h_{\text{л}}$ наблюдаются большие по модулю положительные коэффициенты корреляции для пары $H_{\text{лдж}} — h_{\text{л}}$, и это свидетельствует о том, что в данных пунктах максимальный ледоходный уровень будет определяться максимальной толщиной льда в пункте наблюдения.

Также можно сделать вывод об уменьшении коэффициента корреляции для пары максимальный ледоходный уровень — разность максимальных значений толщины льда от истока к устью, что связано с увеличением детерминированных вкладов других факторов. Пункт наблюдения близ д. Каликино характеризуется высоким коэффициентом корреляции (0,51) для пары $H_{\text{лдж}} — h_{\text{л}}$. Это значение коэффициента является максимальным и более нигде не повторяется. Данная хорошая связь обусловила возможность создания методики большой заблаговременности [2] для прогнозирования максимального ледоходного уровня в д. Каликино. Однако, поскольку подобный коэффициент корреляции является, скорее, исключением, следует сделать вывод о невозможности использования подобного подхода к прогнозированию как универсального.

В целом нельзя сказать, что коэффициенты корреляции в данной таблице являются статистически значимыми, однако подразумевается их использование с другими предикторами, где они могут себя хорошо зарекомендовать. Важно отметить, что связь между $h_{\text{л}}$ и $\Delta h_{\text{л}}$ может отсутствовать, что позволяет применять эти предикторы в паре. Таким образом, данные предикторы не противоречат друг другу, а друг друга дополняют.

В качестве примера использования данного предиктора для прогнозирования максимального уровня ледохода были обучены сети RBF в программе *Statistica 10* [9], а также было составлено уравнение множественной регрессии (табл. 4). Для прогнозирования были использованы следующие предикторы по гидрологическому посту в г. Великий Устюг и д. Медведки: максимальный уровень в начале ледостава, разность максимальных значений толщины льда в пункте наблюдения и по течению ниже и максимальная толщина льда в пункте наблюдения. Оправдываемость отдельных прогнозов рассчитана при допустимой ошибке, равной одному метру.

Таблица 4

Результаты прогнозирования максимального ледоходного уровня
р. Сухона — г. Великий Устюг

Оценка прогнозов	Модель	
	RBF 3-12-1	Уравнение множественной регрессии
R	0,62	0,56
S/q	0,73	0,90
NSE	0,44	0,32
Оправдываемость, %	60	52
Оценка ГМЦ	Удовлетворительно	Неудовлетворительно

Предиктором, вторым по значимости после максимального уровня воды в начале ледостава, является разность значений толщины льда. Это свидетельствует о том, что, несмотря на удовлетворительные результаты прогнозирования, предиктор, предложенный в рамках данной работы, является необходимым при прогнозировании максимальных уровней ледохода. При этом для повышения качества выпускаемых прогнозов следует использовать данные о запасах воды в снеге, температуре воздуха в период снеготаяния, порядке вскрытия рек. Однако даже при наличии своевременного прогноза максимального заторного уровня воды для предупреждения экономического и экологического ущерба необходим ежедневный анализ складывающейся ледовой ситуации [1].

Заключение

По причине повышения средних за зиму значений температуры воздуха наблюдается статистически значимое уменьшение максимальной толщины льда на реках бассейна Северной Двины — в среднем на 20—30 см. Отмечается увеличение периода свободного русла примерно на 20 дней и, следовательно, увеличение периода навигации. Предиктор, предложенный в рамках данной работы, является статистически значимым и физически обоснованным. Он косвенно характеризует разницу прочности льда в пункте наблюдения и в пункте ниже по течению. Данный предиктор не является универсальным и не может применяться повсеместно в силу особенностей расположения гидрологических постов. Связь между данным предиктором и максимальным уровнем ледохода при прочих равных условиях является нелинейной. В области, где разность значений толщины льда становится отрицательной, коэффициент корреляции принимает отрицательные значения, там, где разность близка к нулю, — нулевые, там, где разность положительная — положительные.

Разработка моделей прогнозирования основных гидрологических характеристик, в которых данный параметр займет свое место, является одной из основных задач в дальнейших исследованиях автора.

Выражаю благодарность д-ру геогр. наук, проф. Н.В. Мякишевой и канд. геогр. наук Л.С. Баницковой за ценные советы при планировании исследования и рекомендации по оформлению статьи.

Список литературы

1. Баницкова Л.С. Мониторинг процесса заторообразования на реках по пространственно-временным графикам уровня воды // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 87—93.
2. Бузин В.А. Зажоры и заторы льда на реках России. СПб: изд-во ГГИ, 2015. 240 с.
3. Бузин В.А., Горошкова Н.И., Стриженок А.В., Палкина Д.А. Зависимости для прогнозов максимальных заторных уровней воды Сухоны, Юга и Малой Северной Двины и влияние на них климатических и антропогенных факторов // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 36. С. 12—21.
4. Виноградов А.Ю., Никифоровский А.А. Анализ соответствия критериев качества моделирования процессов формирования стока малых рек // Вестник МГОУ. 2015. № 2. С. 33—38.
5. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник. СПб: изд-во РГГМУ, 2013. 408 с.

6. *Понов Е.Г.* Основы гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 294 с.
7. *Сумачев А.Э.* Изменение климата и его влияние на гидрологический режим Северной Двины // Естественные и технические науки. 2018. Вып. 9.
8. *Nash J. E. Sutcliffe J. V.* River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles // J. Hydrol. 1970, 10 (3). P. 282—290.
9. *StatSoft, Inc.* Электронный учебник по статистике. М., 2012. StatSoft. WEB:<http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (дата обращения 08.10.2018).
10. *Sumachev A., Kuzmin V., Borodin E.* River Flow Forecasting Using Artificial Neural Networks // Int. J. Mech. Eng. Tech. 2018, 9 (10). P. 706—714.